

ANALIZA OPSTRUJAVANJA OKO ČESTICE MIKROPLASTIKE

Putinja, Danijel

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:580637>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-20**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**ANALIZA OPSTRUJAVANJA OKO ČESTICE
MIKROPLASTIKE**

Rijeka, srpanj 2024.

Danijel Putinja

0069086444

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**ANALIZA OPSTRUJAVANJA OKO ČESTICE
MIKROPLASTIKE**

Mentor: Prof. dr. sc. Lado Kranjčević

Komentor: mag. ing. mech. Ante Sikirica

Rijeka, srpanj 2024.

Danijel Putinja

0069086444

Rijeka, 20. ožujka 2024.

Zavod: **Zavod za mehaniku fluida i računalno inženjerstvo**
Predmet: **Dinamika fluida**
Grana: **2.15.04 mehanika fluida**

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Danijel Putinja (0069086444)**
Studij: Sveučilišni diplomski studij strojarstva
Modul: Računarska mehanika i inženjerstvo

Zadatak: **Analiza opstrujavanja oko čestice mikroplastike**

Opis zadatka:

Provesti numeričke simulacije opstrujavanja oko čestice mikroplastike pri niskim Reynoldsovim brojevima koristeći softver OpenFOAM. Usporediti 2D i 3D modele opstrujavanja čestice i analizirati kako se ovi modeli podudaraju s analitičkim rješenjima. Potrebno je u obzir uzeti i rotaciju čestice te njezin utjecaj na promjenu koeficijenta otpora. Detaljno opisati postupak simulacije, metode koje ste koristili, dobivene rezultate i zaključke o utjecaju dimenzionalnosti.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

Zadatak uručen pristupniku: 20. ožujka 2024.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za
diplomski ispit:

prof. dr. sc. Lado Kranjčević

izv. prof. dr. sc. Igor Bonefačić

Ante Sikirica (komentor)

IZJAVA

Sukladno „Pravilniku o diplomskom radu, diplomskom ispitu i završetku diplomskih sveučilišnih studija“, izjavljujem da sam samostalno, koristeći stečena znanja tijekom studiranja i navedenu literaturu izradio ovaj diplomski rad prema zadatku „Analiza opstrujavanja oko čestice mikroplastike“.

Rijeka, srpanj 2024.

Danijel Putinja

0069086444

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentoru, prof. dr. sc. Ladi Kranjčeviću, na mentorstvu i vodstvu tijekom cijele izrade ovog rada. Također, iskreno se zahvaljujem dr. sc. Marti Alvir i mag. ing. mech. Anti Sikirica na nesebičnoj pomoći, dostupnosti i dragocjenim savjetima koji su mi pružili tijekom ovog procesa.

Posebno bih želio izraziti svoju zahvalnost prijateljima, kolegama te posebice cimerima koji su mi olakšali boravak u Rijeci. Njihova podrška i pomoć bili su od velike važnosti u svakom trenutku.

Na kraju, od srca zahvaljujem svojoj obitelji i djevojci na neizmjernej pomoći u teškim trenucima i konstantnoj podršci tijekom cijelog mog fakultetskog obrazovanja. Bez njihove ljubavi, razumijevanja i ohrabrenja, ovaj uspjeh ne bi bio moguć.

SADRŽAJ

1	UVOD	1
2	MEHANIKA FLUIDA	2
2.1	Povijest mehanike fluida	2
2.2	Svojstva fluida.....	3
2.2.1	Gustoća.....	3
2.2.2	Tlak zasićenja pare i kavitacija	4
2.2.3	Energija i specifična toplina	4
2.2.4	Stlačivost i brzina zvuka	6
2.2.5	Viskoznost fluida.....	7
2.2.6	Površinska napetost i kapilarni efekt.....	9
2.3	Klasifikacija strujanja fluida	9
2.3.1	Viskozno i neviskozno područje strujanja	9
2.3.2	Eksterno strujanje i interno strujanje.....	10
2.3.3	Stlačivo i nestlačivo strujanje fluida	10
2.3.4	Turbulentno i laminarno strujanje	10
2.3.5	Prirodno i prisilno strujanje.....	12
2.3.6	Stacionarno i nestacionarno strujanje.....	12
2.3.7	Jednodimenzionalno, dvodimenzionalno i trodimenzionalno strujanje.....	13
2.4	Aerodinamika	13
3	STRUJANJE PRI NISKIM REYNOLDSOVIM BROJEVIMA.....	15
3.1	Navier Stokesove jednačbe	15
3.2	Stokesov zakon.....	17
4	PRIPREMA NUMERICKE SIMULACIJE.....	20
4.1	Računarska dinamika fluida	20
4.2	Mikroplastika	20
4.3	Izrada geometrije.....	21

4.3.1	Izrada 2D geometrije	21
4.3.2	Izrada 3D geometrije	23
4.4	Izrada numeričke mreže	25
4.4.1	Izrada 2D mreže	26
4.4.2	Izrada 3D mreže	28
4.4.3	Nazivi linija/ploha	31
5	POSTAVLJANJE SLUČAJA U OPENFOAM-U	32
5.1	OpenFOAM slučaj nerotirajuće čestice	32
5.2	OpenFOAM slučaj rotirajuće čestice	37
5.3	Pokretanje simulacije na superračunalu Bura	37
6	ANALIZA OPENFOAM REZULTATA.....	40
6.1	Rezultati nerotirajuće čestice u OpenFOAM-u	40
6.2	Rezultati rotirajuće čestice u OpenFOAM-u.....	45
6.3	Usporedba rezultata nerotirajuće i rotirajuće čestice	49
6.3.1	Usporedba rezultata za 2D slučaj	49
6.3.2	Usporedba rezultata za 3D slučaj	51
7	POSTAVLJANJE SLUČAJA U ANSYS FLUENTU.....	55
7.1	Ansyes Fluent slučaj nerotirajuće čestice	55
7.2	Ansyes Fluent slučaj rotirajuće čestice	56
8	USPOREDBA REZULTATA.....	57
8.1	Rezultati dobiveni u Ansys Fluent-u	57
8.1.1	Vizualizacija rezultata nerotirajuće čestice	57
8.1.2	Vizualizacija rezultata rotirajuće čestice	59
8.2	Usporedba rezultata OpenFOAM/Ansys Fluent	62
9	ZAKLJUČAK	69
10	LITERATURA.....	71

1 UVOD

Poseban oblik Navier Stokesovih jednadžbi u kojemu je moguće dobiti analitička rješenja magnitude brzine i statičkog tlaka za opstrujavanje fluida u okolici sfere naziva se Stokesov zakon. Gibanje čestice mikroplastike u strujnom polju je tipičan primjer problema koji podliježe Stokesovom zakonu. S obzirom da se mikroplastika uobičajeno taloži na dnu mora/oceana gdje prevladavaju jako male brzine strujanja, moguće je zaključiti kako je Reynoldsov broj malen. Jedna od glavnih značajki Stokesovog zakona uz nestlačivost strujanja jest Reynoldsov broj manji od jedan. S obzirom na takvu vrijednost Reynoldsovog broja, riječ je o laminarnom strujanju. Brzina strujanja je u radu zadana tako da uz promjer čestice mikroplastike Reynoldsov broj iznosi 0,5.

Cilj ovog rada je napraviti usporedbu analitičkih rezultata magnitude brzine i statičkog tlaka s numeričkim rezultatima. Uspoređuju se sila otpora te koeficijent otpora dobiven analitičkim formulama s numeričkim rezultatima. Za dobivanje numeričkih rezultata korišteni su softveri *OpenFOAM* i *Ansys Fluent*. Korištena je pojednostavljena 2D domena te kompleksnija 3D domena. U *OpenFOAM*-u je postavljena nestacionarna simulacija za 2D i 3D domenu, dok je u *Ansys Fluent*-u postavljena stacionarna simulacija. Kod nestacionarne simulacije dolazi do promjene svojstava u vremenu. Kako bi se ispitao utjecaj rotacije čestice postavljeno je nekoliko simulacija za 2D i 3D slučaj s različitim kutnim brzinama rotacije. S obzirom na kompleksnost *OpenFOAM* nestacionarne simulacije, slučajevi su pokretani na superračunalu Bura.

Analiza rezultata napravljena je uz pomoć programskog jezika Python. Nakon izvlačenja svih rezultata na središnjoj liniji ($y = 0$ i $z = 0$), izračunato je srednje kvadratno odstupanje skupova rezultata za magnitudu brzine i statički tlak. Napravljena je usporedba između analitičkih rezultata te rezultata 2D i 3D nestacionarne *OpenFOAM* simulacije nerotirajuće čestice mikroplastike. Kod usporedbe *Ansys Fluent* stacionarnih simulacija, 2D i 3D rezultati nestacionarne *OpenFOAM* simulacije nerotirajuće čestice bili su referentni.

Nestacionarnim *OpenFOAM* simulacijama dobiveni su rezultati koji se približno poklapaju s rezultatima dobivenima u stacionarnim *Ansys Fluent* simulacijama. Povećanjem kutne brzine rotacije čestice mikroplastike odstupanja rastu te se područje u bližoj okolici čestice sve više udaljava od analitičkih vrijednosti.

2 MEHANIKA FLUIDA

Mehanika fluida je potkategorija mehanike koja je najstarija znanost koja se bavila fizikom stacionarnog i gibajućeg tijela pod utjecajem sila [1]. Kao i sama mehanika, mehanika fluida se bavi statikom fluida i dinamikom fluida te interakcijom fluida sa čvrstim tijelima ili drugim fluidima na dodirnim površinama. Fluid se definira kao materija u tekućoj ili plinovitoj agregatnoj fazi.

2.1 Povijest mehanike fluida

Jedan od prvih problema na koje je čovječanstvo naišlo je opskrba gradova i usjeva vodom. Rimski akvadukti, koji se još uvijek negdje koriste, najstariji su poznati primjer cjevovoda za dovod vode. U Pergamonu (današnja Turska) između 283. i 133. pr. Kr. izgrađen je tehnološki vrlo napredan cjevovod od olova i gline. Cjevovod je bio dug 45 km te je radio pri tlaku od 1,7 MPa. Najraniji priznati teorijski pristup mehanici fluida pripada Arhimedu [1]. Slika 2.1. prikazuje cjevovod u Pergamonu.



Slika 2.1 Cjevovod od gline i olova [1]

Tijekom Srednjeg vijeka praktični pristup u mehanici fluida se povećao. Ljudi su koristili pumpe za ispumpavanje vode iz rudnika, snaga vode i vjetra korištena je u mlinovima, kovačnicama itd. Kroz renesansu, pa sve do početka 20. st. došlo je do velikog napretka u teorijskom dijelu mehanike fluida.

Početak 20. st. donio je bitan napredak u praktičnom pogledu mehanike fluida. Braća Wright izumila su prvi zrakoplov primjenom teorije i mnogim eksperimentima. Zrakoplov braće Wright preteča je današnjeg modernog zrakoplova. Uz napredak teorije rasla je i primjena mehanike fluida u aeronautici, kemijskom inženjerstvu, industriji te sektoru vodnih resursa.

2.2 Svojstva fluida

Mehanika fluida podrazumijeva mijenjanje strukture materije hipotetskim kontinuumom koji zadržava neprekidnost fizikalnih svojstava prelazeći i u infinitezimalne volumene kao nulti volumen tj. točku [2].

2.2.1 Gustoća

Gustoća se definira kao masa po jedinici volumena. Gustoća generalno ovisi o temperaturi i tlaku. Recipročna vrijednost gustoće daje specifični volumen:

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (2.1)$$

$$v = \frac{1}{\rho} = \frac{V}{m}. \quad (2.2)$$

Gdje je: ρ - gustoća fluida [kg/m^3],
 m - masa [kg],
 V - volumen [m^3],
 v - specifični volumen [m^3/kg].

Uz jednadžbu idealnog plina može se za bilo koji plin uz pomoć poznatog tlaka i temperature izračunati gustoća fluida. Jednadžba idealnog plina glasi:

$$Pv = RT. \quad (2.3)$$

Gdje je: P - apsolutni tlak [Pa],
 T - termodinamička temperatura [K],

R - plinska konstanta [$\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$].

2.2.2 Tlak zasićenja pare i kavitacija

Kod čistih tvari poznato je da su temperatura i tlak ovisni jedno o drugom. Pri tlaku zasićenja zbiva se zasićenje vodene pare, a za tlak zasićenja postoji odgovarajuća temperatura koja se naziva temperatura zasićenja. U slučaju kada se stvori ravnoteža između količine molekula koje ishlapljuju te napuštaju kapljevину te količine molekula koje se vraćaju u fluid dolazi do tlaka zasićenja pri kojemu je para zasićena. Tlak zasićenja proporcionalan je rastu temperature. Kada se mjehurići pare počnu formirati unutar kapljevine, pri tlaku zasićenja, započinje vrenje.

Zbog vrenja dolazi do pojave kavitacije. Problem kavitacije najčešće se javlja kod zatvorenih sustava i turbostrojeva. Kod ovakvih sustava dolazi do pojave niskog tlaka. Ukoliko je niski tlak niži od tlaka zasićenja pare stvaraju se mjehuri unutar fluida. Mjehuri pare pomakom iz zone niskog tlaka pucaju te stvaraju visokotlačni val u svojoj okolini. Pucanje mjehura i stvaranje visokotlačnog vala može oštetiti lopatice turbostrojeva. Na slici 2.2. može se vidjeti oštećenje uslijed kavitacije.



Slika 2.2 Kavitacija [1]

2.2.3 Energija i specifična toplina

Ukupna energija sustava E [J] ili specifična energija sustava e [J/kg] sastoji se od zbroja različitih vrsta energije poput toplinske, mehaničke, kinetičke, potencijalne, magnetske, kemijske, nuklearne itd. Energija povezana s molekularnom strukturom te molekularnom aktivnošću pripada skupini mikroskopskih oblika energije. Zbroj svih mikroskopskih oblika energije daje unutarnju energiju sustava U [J] ili specifičnu unutarnju energiju sustava u [J/kg]. Makroskopska energija sustava promatra gibanje sustava i utjecaj vanjskih sila poput gravitacije, magneta, struje i površinske napetosti na sustav.

Od makroskopskih energija najznačajnije su kinetička i potencijalna energija:

$$k_e = \frac{V^2}{2}, \quad (2.4)$$

$$p_e = g \cdot z. \quad (2.5)$$

Gdje je: k_e - specifična kinetička energija [J/kg],
 V - relativna brzina sustava [m/s],
 p_e - specifična potencijalna energija [J/kg],
 g - gravitacijska konstanta [m/s²],
 z - visinska razlika centra gravitacije sustava u odnosu na referentnu točku [m].

Kod sustava koji uključuju tok fluida često se promatra kombinacija specifične unutarnje energije i umnoška tlaka sa specifičnim volumenom. Zbrajanjem varijabli dobiva se specifična entalpija:

$$h = u + Pv = u + \frac{P}{\rho}. \quad (2.6)$$

Gdje je: h - specifična entalpija [J/kg],
 u - specifična unutarnja energija [J/kg],
 $\frac{P}{\rho}$ - energija toka/rad toka.

Ukupna energija jednostavnih stlačivih sustava sastoji se od unutarnje, kinetičke i potencijalne energije. Fluid koji dolazi i napušta kontrolni volumen uzima u obzir i energiju toka. Ukupna specifična energija nestacionarnog fluida iznosi:

$$e = \frac{P}{\rho} + u + k_e + p_e, \quad (2.7)$$

$$e = h + k_e + p_e, \quad (2.8)$$

$$e = h + \frac{V^2}{2} + g \cdot z. \quad (2.9)$$

2.2.4 Stlačivost i brzina zvuka

Poznato je kako se volumen fluida mijenja s promjenom tlaka i temperature. Zagrijavanjem fluida te smanjivanjem tlaka fluid se uobičajeno širi dok se tlačenjem fluida te smanjivanjem temperature fluid smanjuje volumen. Povećavanje i smanjivanje volumena fluida ovisi i o vrsti samog fluida, stoga je potrebno definirati svojstva koja će opisivati promjenu volumena u ovisnosti o navedenim faktorima. Prvi je faktor koeficijent stlačivosti:

$$k = -v \left(\frac{\delta P}{\delta v} \right)_T = \rho \left(\frac{\delta P}{\delta \rho} \right)_T. \quad (2.10)$$

Gdje je: k - koeficijent stlačivosti [Pa].

Velika vrijednost koeficijenta stlačivosti sugerira kako je potrebna velika promjena u tlaku kako bi se malo promijenio volumen. Fluid kod kojeg se zbiva mala promjena volumena pri velikoj promjeni tlaka opisuje se kao nestlačivi fluid. Modul elastičnosti recipročna je vrijednost koeficijentu stlačivosti.

Drugi faktor koji je potrebno definirati je koeficijent volumne ekspanzije:

$$\beta = \frac{1}{v} \left(\frac{\delta v}{\delta T} \right)_P = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\delta \rho}{\delta T} \right)_P. \quad (2.11)$$

Gdje je: β - koeficijent volumne ekspanzije [1/K].

Bitan parametar u proučavanju stlačivih tokova fluida je brzina zvuka. Zvučni valovi u fluidima mogu nastati bez prisutnosti vanjske sile. Zvučni se val širi neovisno o vanjskoj sili, a ravnotežu sustava daje stlačivost fluida. Brzina zvuka u fluidu ovisi o stlačivosti i gustoći fluida:

$$c = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (2.12)$$

Gdje je: c - brzina zvuka [m/s].

U slučaju idealnih plinova tlak pri konstantnoj temperaturi nema utjecaj na brzinu zvuka. Brzina zvuka kod idealnih plinova približno je jednaka za promjenjive frekvencije i amplitude valova stoga brzina zvuka iznosi:

$$c = \sqrt{kRT}. \quad (2.13)$$

Iz navedenih se jednadžbi može zaključiti kako je zbog manje stlačivosti kapljevina brzina zvuka u istima veća nego u plinovima.

Machov broj važan je bezdimenzijski faktor u analizi nestlačivih tokova fluida. Machov broj je omjer između stvarne brzine fluida (ili objekta koji stoji u fluidu) te brzine zvuka u fluidu istog stanja:

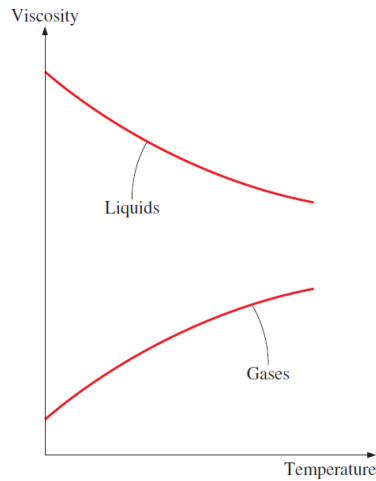
$$Ma = \frac{V}{c}. \quad (2.14)$$

Gdje je: Ma - Machov broj.

S obzirom na Machov broj tok se dijeli na podzvučni ($Ma < 1$), zvučni ($Ma = 1$), nadzvučni ($Ma > 1$).

2.2.5 Viskoznost fluida

Viskoznost se može definirati kao trenje između slojeva fluida. Trenje se zbiva zbog različitih brzina gibanja pojedinačnih slojeva fluida. Brzina slojeva u blizini hrapave statične stijenke manja je u odnosu na slojeve udaljenije od same stijenke. Viskoznost se može definirati i kao svojstvo otpornosti fluida prema smičnoj deformaciji [2]. Promjenom temperature viskoznost se mijenja, dok se promjenom tlaka ne mijenja. Povećanjem temperature kapljevine viskoznost se smanjuje dok je kod plinova suprotno. Na slici 2.3 prikazana je ovisnost viskoznosti fluida o temperaturi fluida.

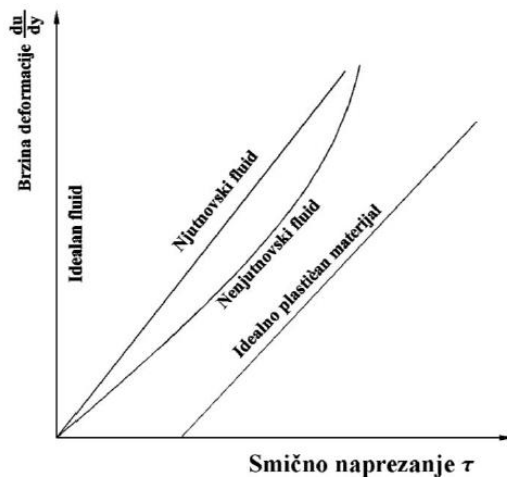


Slika 2.3 Ovisnost viskoznosti o temperaturi [1]

Fluidi se na temelju Newtonovog zakona viskoznosti dijele na Njutnovske (*eng. Newtonian fluid*) i Nenjutnovske (*eng. Non-Newtonian fluid*). Slika 2.4 prikazuje podjelu fluida s obzirom na viskoznost. Kod Njutnovskih fluida linearna je ovisnost brzine deformacije i smičnog naprezanja, dok kod Nenjutnovskih ne postoji linearna ovisnost. Smično naprezanje izračunava se na sljedeći način:

$$\tau = \mu \cdot \frac{du}{dy} \quad (2.15)$$

Gdje je: τ - smično naprezanje [Pa],
 μ - dinamička viskoznost [Pas],
 $\frac{du}{dy}$ - brzina kutne deformacije [1/s].



Slika 2.4 Podjela fluida s obzirom na viskoznost [2]

Dinamička viskoznost je fizikalna veličina koja opisuje unutarnje trenje među slojevima fluida. Kinematička je viskoznost definirana kao omjer dinamičke viskoznosti i gustoće fluida:

$$v = \frac{\mu}{\rho}. \quad (2.16)$$

Gdje je: v - kinematička viskoznost [$\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$],
 μ - dinamička viskoznost [Pas].

2.2.6 Površinska napetost i kapilarni efekt

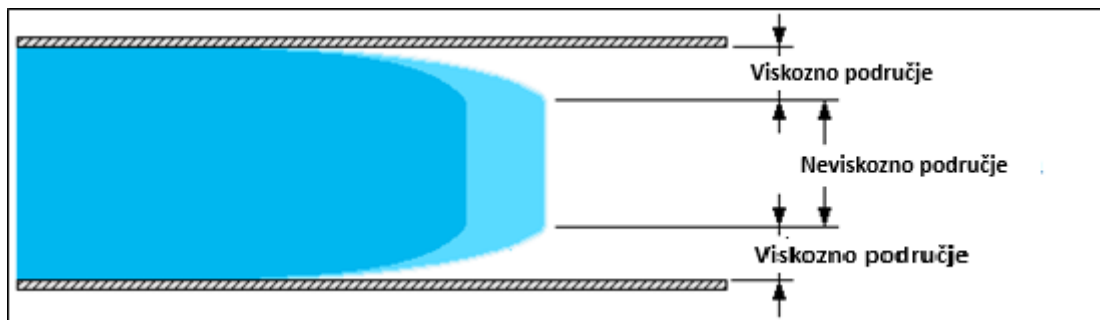
Kapljice fluida se na slobodnoj površini ponašaju kao mali baloni ispunjeni tekućinom. Sama površina fluida ponaša se kao napeta elastična membrana. Privlačna sila koja uzrokuje napetost paralelna je s površinom samog fluida. Intenzitet ovakvih privlačnih sila po jedinici duljine naziva se površinska napetost. Površinska napetost fluida može odstupati s obzirom na čistoću fluida. Dodavanjem surfaktanata smanjuje se površinska napetost fluida.

Posljedica površinske napetosti izražava se u kapilarnom efektu. Kod ovakvog se efekta zbiva povišenje ili sniženje stupca fluida u kapilari. Kapljevine kod kojih se zbiva fenomen podizanja stupca u kapilari nazivaju se vlažeće kapljevine, dok se one kod kojih se spušta stupac u kapilari nazivaju nevlažeće kapljevine. Primjer vlažeće kapljevine je voda, a nevlažeće kapljevina je živa. Kapilarni efekt ima bitnu ulogu kod biljaka.

2.3 Klasifikacija strujanja fluida

2.3.1 Viskozno i neviskozno područje strujanja

S obzirom na viskoznost strujanje se dijeli na viskozno (*eng. viscous*) i neviskozno (*eng. inviscid*) strujanje. Ukoliko nema trenja između slojeva fluida tada je tok neviskoznan. Neviskozno strujanje fluida u prirodi ne postoji, no koristi se kako bi se pojednostavile matematičke jednadžbe. Kod viskoznog strujanja dolazi do efekta u kojem sporiji slojevi fluida koji se nalaze bliže stjenki ili drugom fluidu usporavaju brže slojeve fluida koji su udaljeniji od tog područja. Viskozno i neviskozno područje unutar cijevi vidi se na slici 2.5.



Slika 2.5 Viskozno i neviskozno područje strujanja fluida [3]

2.3.2 Eksterno strujanje i interno strujanje

U slučaju strujanja fluida oko čvrstih tijela poput ploče, žice, sfere itd. dolazi do eksternog strujanja (*eng. external flow*). Strujanje unutar cijevi naziva se interno (*eng. internal flow*) strujanje. Strujanje u otvorenom kanalu spadalo bi u zasebnu kategoriju strujanja kod koje je jedna površina slobodna dok je druga ispunjena fluidom tj. u direktnom dodiru. Kod internog strujanja dominiraju viskozni učinci na cijelom području toka, dok je kod eksternog strujanja viskozni efekt prisutan u blizini tijela te se smanjuje udaljavanjem od istog.

2.3.3 Stlačivo i nestlačivo strujanje fluida

Strujanje se definira kao stlačivo (*eng. compressible*) ili nestlačivo (*eng. incompressible*) u ovisnosti o promjeni gustoće fluida. Ukoliko se mijenja gustoća fluida, koja kao što je prethodno navedeno ovisi o temperaturi i tlaku, tok je stlačiv. Nestlačiv tok fluida aproksimacija je toka koji zadržava konstantnu gustoću. Tok kapljevine u pravilu je nestlačiv. Tok plinova ovisi o Machovom broju. Ukoliko Machov broj iznosi manje od 0,3 stlačivost plina se zanemaruje. Stlačiv tok bitan je kod opisivanja strujanja plinova pri velikim brzinama kroz cijev, mlaznicu, turbinu itd.

2.3.4 Turbulentno i laminarno strujanje

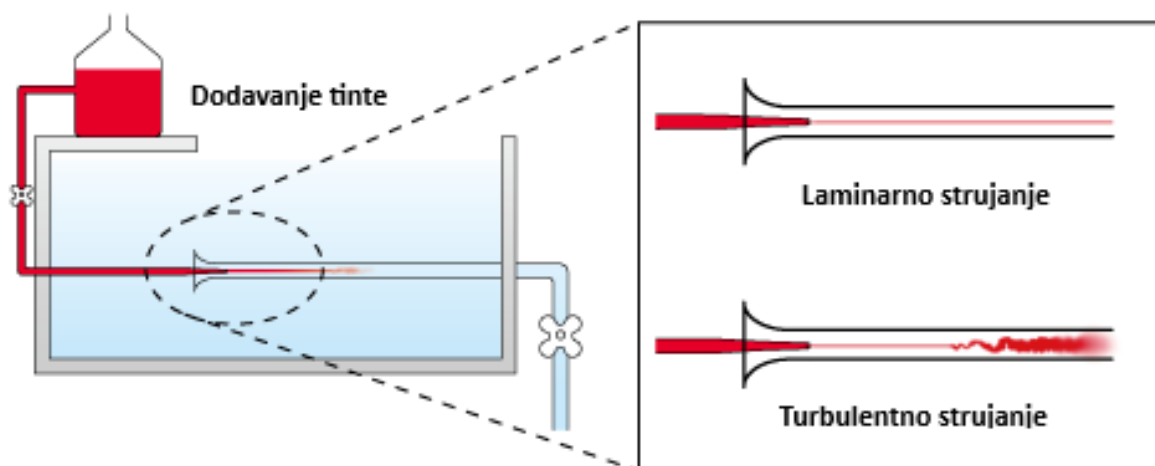
Strujanje fluida dijeli se na laminarno, prijelazno i turbulentno strujanje. Ovakva podjela strujanja najviše ovisi o Reynoldsovom broju.

Osborne Reynolds je 1880-ih godina otkrio kako strujanje fluida ovisi uglavnom o omjeru inercijskih sila i viskoznih sila unutar fluida. Omjer je opisan bezdimenzijskim brojem koji se u njegovo ime naziva Reynoldsov broj:

$$Re = \frac{V_{avg} \cdot D}{\nu} = \frac{\rho \cdot V_{avg} \cdot D}{\mu} \quad (2.17)$$

Gdje je: Re - Reynoldsov broj,
 V_{avg} - prosječna brzina fluida [m/s],
 D - karakteristična duljina geometrije [m].

Reynolds je eksperimentom odredio i režime strujanja. Eksperiment se sastojao od cijevi kroz koju je strujao fluid. Brzina fluida promjenjiva je, a u cijev se dodavala tinta. Pri niskoj brzini strujanja odnosno niskim Reynoldsovima nije se zbivalo odvajanje slojeva fluida. Povećanjem Reynoldsovog broja došlo je do fluktuacija te potpunog turbulentnog strujanja fluida. Prikaz Reynoldsovog eksperimenta nalazi se na slici 2.6.



Slika 2.6 Reynoldsov eksperiment [4]

Laminarno strujanje podrazumijeva gibanje čestica fluida po glatkim putanjama u slojevima koji klize jedan po drugom. Strujanje je laminarno kod $Re \leq 2300$. U području između $2300 \leq Re \leq 4000$ strujanje je prijelazno. Kod prijelaznog strujanja dolazi do početka miješanja između slojeva fluida. U trenutku kada strujanje prijeđe kritični Reynoldsov broj, režim strujanja postaje turbulentan. Kod turbulentnog strujanja zbiva se nepravilno gibanje čestica fluida s velikim promjenama brzine u svim česticama fluida. Navedene granice vrijede u većini realnih situacija strujanja [2]. Strujanje s malim vrijednostima Reynoldsovog broja, $Re \ll 1$ naziva se puzajuće ili Stokesovo strujanje.

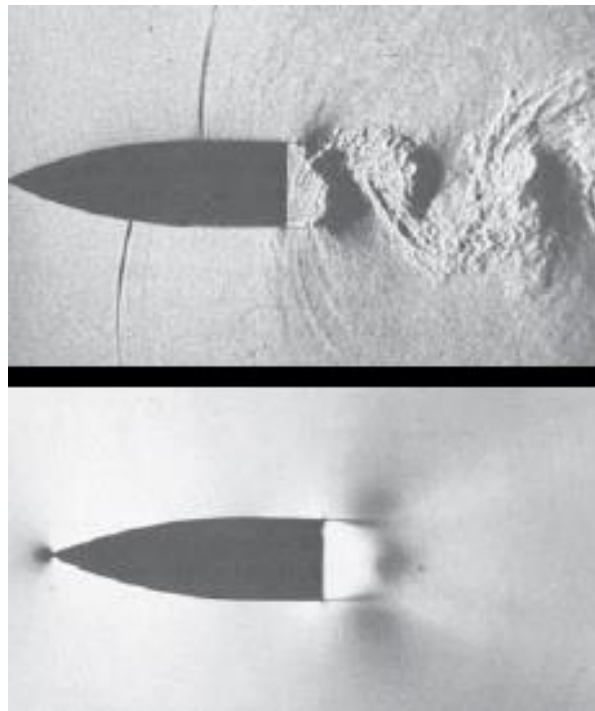
2.3.5 Prirodno i prisilno strujanje

Ova je podjela strujanja s obzirom na to kako je sam fluid pokrenut. Kod prisilnog strujanja fluid je pokrenut vanjskim utjecajem poput ventilatora ili pumpe. Kod prirodnog kretanja fluida uzgon je glavni čimbenik kretanja fluida. Uzgon se može vidjeti podizanjem fluida više temperature te spuštanjem fluida niže temperature.

2.3.6 Stacionarno i nestacionarno strujanje

Stacionarno strujanje (*eng. steady flow*) je termin kod kojeg nema promjene svojstava, brzine, temperature i ostalih svojstava u niti jednoj točki kroz vrijeme. Suprotno od stacionarnog je nestacionarno strujanje (*eng. unsteady flow*) kod kojeg dolazi do promjena parametara u vremenu. Kod nestacionarnih tokova svojstva periodički osciliraju oko usrednjene vrijednosti.

Strojevi poput turbina, pumpi, kondenzatora i bojlera mogu se promatrati kao stacionarni strojevi jer rade dugo vremena pod istim uvjetima. Tijekom stacionarnog strujanja svojstva fluida mogu se mijenjati od točke do točke unutar stroja, ali u svakoj zasebnoj točki uvijek su ista. S obzirom na to volumen, masa i ukupna energija stroja kod stacionarnog strujanja ostaje konstantna. Pojam uniformno strujanje govori kako nema promjene intenziteta i smjera brzine s promjenom položaja. Usporedba trenutnog rezultata u vremenskom koraku nestacionarnog strujanja i usrednjenog rezultata stacionarnog strujanja može se vidjeti na slici 2.7.



Slika 2.7 Nestacionarno (trenutno) vs stacionarno (usrednjeno) [1]

2.3.7 Jednodimenzionalno, dvodimenzionalno i trodimenzionalno strujanje

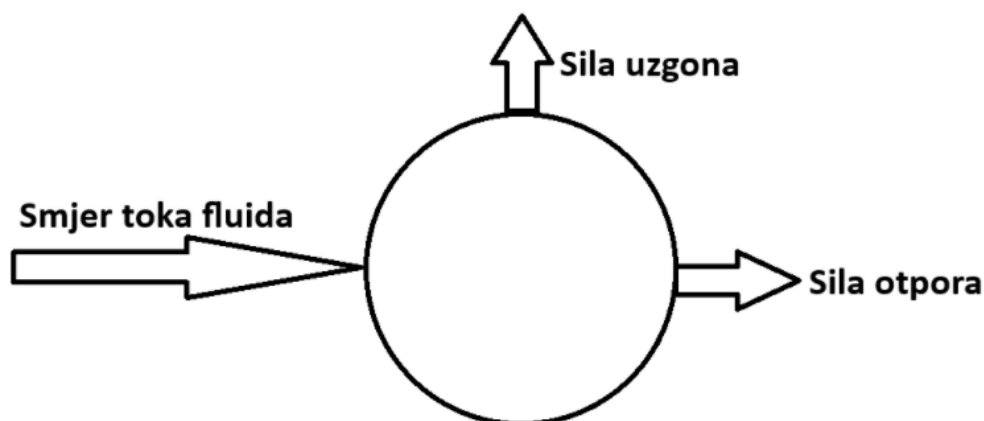
S obzirom na broj potrebnih prostornih koordinata koje opisuju strujno polje, strujanje se može klasificirati kao jednodimenzionalno, dvodimenzionalno i trodimenzionalno strujanje. Uobičajeno strujanje fluida zbiva se oko trodimenzionalne geometrije te su stoga potrebne sve tri koordinate za opisivanje strujnog polja. Neki se problemi mogu pojednostaviti tako da se svedu na jednodimenzionalno ili dvodimenzionalno strujanje. Jednodimenzionalnim strujanjem aproksimira se strujanje kroz dugu ravnu cijev konstantnog presjeka dok se dvodimenzionalnim strujanjem može aproksimirati tok rijeka.

2.4 Aerodinamika

Znanstvena disciplina koja pripada mehanici fluida te proučava strujanje fluida i sile kojima fluid djeluje na tijelo kada između tijela i fluida postoji relativno gibanje naziva se aerodinamika.

Postoje dva osnovna izvora koja djeluju na aerodinamičke sile i momenta na određenom tijelu. Raspodjela tlaka po površini tijela prvi je izvor, dok je drugi izvor raspodjela posmičnog naprezanja po površini tijela. Tlak po površini tijela djeluje u smjeru normale, a posmično naprezanje na površini djeluje u smjeru tangente. Djelovanjem tlaka i posmičnog naprezanja dobiva se rezultantna sila i moment koji djeluje na tijelo.

Rezultantna sila može se podijeliti na dvije glavne komponente. Komponenta sile koja djeluje okomito na vektor brzine toka fluida (U) naziva se sila uzgona (*eng. lift force*). Sila otpora (*eng. drag force*) komponenta je rezultantne sile te djeluje paralelno s vektorom brzine fluida. Slika 2.8 prikazuje komponente rezultantne sile.



Slika 2.8 Komponente rezultantne sile

Sila uzgona, sila otpora i moment imaju odgovarajuće koeficijente koji mjere njihov utjecaj na objekte. Pri izračunavanju svakog koeficijenta potrebno je uzeti u obzir referentna kontaktna površina između tijela i fluida. Prije definiranja koeficijenata za pojedine sile/moment definira se varijabla koja se naziva dinamički pritisak:

$$q_{\infty} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2. \quad (2.18)$$

Gdje je: q_{∞} - dinamički pritisak [kg/ms²],
 U - brzina strujanja fluida u okolini čestice [m/s].

Koeficijent aerodinamičkog uzgona (*eng. lift coefficient*) glasi:

$$C_L = \frac{F_L}{q_{\infty} \cdot A}. \quad (2.19)$$

Gdje je: A – referentna površina [m²],
 F_L - sila aerodinamičkog uzgona [N],
 C_L – koeficijent aerodinamičkog uzgona.

Koeficijent otpora (*eng. drag coefficient*) glasi:

$$C_D = \frac{F_D}{q_{\infty} \cdot A}. \quad (2.20)$$

Gdje je: F_D - sila otpora zraka [N],
 C_D – koeficijent otpora.

Koeficijent momenta (*eng. moment coefficient*) glasi:

$$C_M = \frac{M}{q_{\infty} \cdot A \cdot l}. \quad (2.21)$$

Gdje je: M – moment koji djeluje na tijelo [Nm],
 l – referentna udaljenost [m],
 C_M – koeficijent momenta.

3 STRUJANJE PRI NISKIM REYNOLDSOVIM BROJEVIMA

3.1 Navier Stokesove jednađbe

Jednađba koja prikazuje zakon ravnoteže količine gibanja za materijalni volumen je:

$$\frac{D}{Dt} \int_{MV} \rho \cdot \vec{v} dV = \int_{MV} \vec{f} dV + \int_{MV} \vec{\sigma}_n dS. \quad (3.1)$$

Primjenom teorema divergencije drugi član u jednađbi se mijenja:

$$\int_{MV} \vec{\sigma}_n dS = \int_{MV} \text{div} T_\sigma dV. \quad (3.2)$$

Iz jednađbi 3.1 i 3.2 slijedi:

$$\int_{MV} \left(\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} - \vec{f} - \text{div} T_\sigma \right) dV = 0. \quad (3.3)$$

Izraz je jednak nuli ukoliko je podintegralni dio jednak nuli te iz toga proizlazi jednađba gibanja fluida:

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} - \vec{f} - \text{div} T_\sigma = 0. \quad (3.4)$$

Jednađba 3.4 prelazi u jednađbu 3.5:

$$\rho \frac{\delta \vec{v}}{\delta t} + \rho \vec{v} \nabla \vec{v} = \vec{f} + \text{div} T_\sigma. \quad (3.5)$$

Kod idealnog neviskoznog fluida zanemaruju se smična naprezanja te stoga proizlazi Eulerova jednađba gibanja:

$$\rho \frac{\delta \vec{v}}{\delta t} + \rho \vec{v} \nabla \vec{v} = -\nabla \vec{p} + \rho \vec{g}. \quad (3.6)$$

Za nestlačiv kontinuirani tok fluida pri kojemu se uzima u obzir viskoznost fluida dobiva se sljedeća Navier Stokesova jednadžba u vektorskom obliku:

$$\rho \frac{\delta \vec{v}}{\delta t} + \rho \vec{v} \nabla \vec{v} = -\nabla p + \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{v}. \quad (3.7)$$

Iz vektorskog oblika mogu se raspisati Navier Stokesove jednadžbe za x, y i z smjer redom:

$$\rho \left(\frac{\delta u}{\delta t} + u \frac{\delta u}{\delta x} + v \frac{\delta u}{\delta y} + w \frac{\delta u}{\delta z} \right) = -\frac{\delta P}{\delta x} + \rho g_x + \mu \left(\frac{\delta^2 u}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 u}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 u}{\delta z^2} \right), \quad (3.8)$$

$$\rho \left(\frac{\delta v}{\delta t} + u \frac{\delta v}{\delta x} + v \frac{\delta v}{\delta y} + w \frac{\delta v}{\delta z} \right) = -\frac{\delta P}{\delta y} + \rho g_y + \mu \left(\frac{\delta^2 v}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 v}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 v}{\delta z^2} \right), \quad (3.9)$$

$$\rho \left(\frac{\delta w}{\delta t} + u \frac{\delta w}{\delta x} + v \frac{\delta w}{\delta y} + w \frac{\delta w}{\delta z} \right) = -\frac{\delta P}{\delta z} + \rho g_z + \mu \left(\frac{\delta^2 w}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 w}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 w}{\delta z^2} \right). \quad (3.10)$$

Gdje je: P - tlak [Pa],
 u, v, w - komponente vektora brzine u smjerovima koordinatnih osi [m/s],
 g_x, g_y, g_z - komponente vektora ubrzanja sile teže [m/s²].

Zbog složenosti Navier Stokesovih jednadžbi moguće ih je analitički riješiti samo u nekim specijalnim slučajevima uz dodatna pojednostavljenja i pretpostavke. Jedno od takvih analitičkih rješenja naziva se Stokesov zakon.

3.2 Stokesov zakon

Stokesov zakon, koji je dobio ime po poznatom matematičaru Georgeu Gabrielu Stokesu, za sferu izrađen je još davne 1851. godine. Ukoliko iz Navier Stokesove jednačbe u vektorskom obliku (3.7) izostavimo ovisnosti o vremenu te zanemarimo utjecaj gravitacije i konvekcijski član ostaju sljedeća jednačba za ujednačeno nestlačivo puzajuće strujanje:

$$\mu \nabla^2 v = \nabla p. \quad (3.11)$$

Jednačba kontinuiteta je također zadovoljena kod Stokesovog zakona:

$$\nabla \cdot \mu = 0. \quad (3.12)$$

Za korištenje ove aproksimacije ključan je uvjet Reynoldsov broj koji mora biti manji od jedan. Uz mali Reynoldsov broj pretpostavlja se i da je samo strujanje laminarno. Jednolično, mirno i usporedno gibanje svih slojeva fluida jednakom brzinom glavne su značajke laminarnog strujanja. Strujanje samog fluida mora biti i nestlačivo.

Stokes je izračunao i konkretna rješenja brzina i efektivnog tlaka na sferi. U slučaju kada se sfera giba konstantnom brzinom kroz viskozni fluid ona postaje centralni dio puzajućeg strujanja. Iz jednačba 3.11 i 3.12 uz odgovarajuće rubne uvjete dobivene su jednačbe za brzine i tlakove uz pomoć sfernog koordinatnog sustava i dodatnih matematičkih manipulacija. Uz pomoć sljedećih izraza za brzine i tlak može se analitički izračunati iste na bilo kojem dijelu domene:

$$u_r = \left(1 - \frac{3a}{2r} + \frac{1a^3}{2r^3}\right) U \cos\theta, \quad (3.13)$$

$$u_\theta = -\left(1 - \frac{3a}{4r} - \frac{1a^3}{4r^3}\right) U \sin\theta, \quad (3.14)$$

$$u_\phi = 0, \quad (3.15)$$

$$p^* = -\frac{3\eta a}{2r^2} U \cos\theta. \quad (3.16)$$

Gdje je: u_r - radijalna komponenta brzine [m/s],

u_θ - polarna komponenta brzine [m/s],

u_ϕ - cirkularna komponenta brzine [m/s],

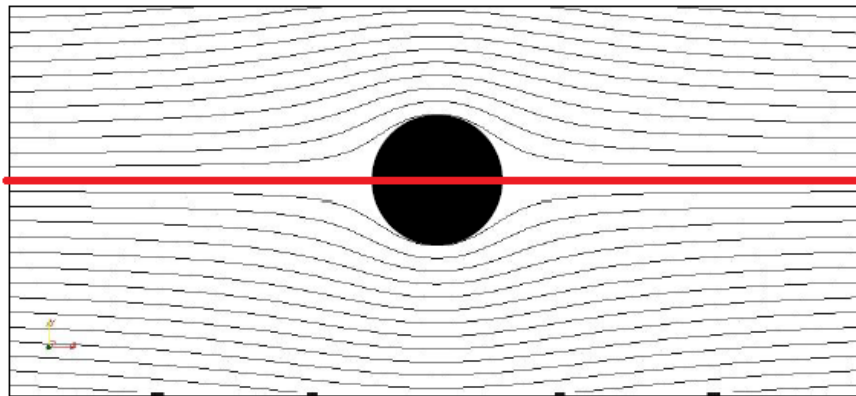
U - brzina strujanja fluida u okolini čestice [m/s],

θ - kut između horizontalne linije koja prolazi središtem čestice i točke u domeni,

a - polumjer sfere [m],

r - udaljenost točke u domeni od središta sfere [m].

Uz izračunate vrijednosti za brzine i tlakove u domeni moguće je analitički odrediti i ukupnu silu na sferi kao i naprezanja na površini sfere. U daljnjem će se dijelu rada uspoređivati analitički i numerički rezultati na horizontalnoj liniji koja prolazi središtem sfere koja se naziva centralna linija. Centralna linija prikazana je crvenom bojom na slici 3.1.



Slika 3.1 Centralna linija [5]

S obzirom da se centralna linija u odnosu na središte sfere nalazi na kutovima $\theta = 0$ i $\theta = \pi$, uvrštavanjem u jednadžbu 3.14 $\sin(0) = 0$ i $\sin(\pi) = 0$ se zaključuje kako je polarna komponenta brzina na centralnoj liniji jednaka nuli. Uz prethodno navedenu činjenicu kako je cirkularna komponenta jednaka nuli, na središnjoj liniji magnituda brzine jednaka je radijalnoj komponenti brzine:

$$u = u_r = \left(1 - \frac{3a}{2r} + \frac{1a^3}{2r^3}\right) U \cos\theta. \quad (3.17)$$

Stokesovim zakonom dobivena je sila otpora koja djeluje na sferu:

$$F_D = 6\pi\mu a U. \quad (3.18)$$

Gdje je: F_d – Sila otpora [Pa].

Uvrštavanjem dobivene sile otpora kod računanja koeficijenta otpora dobiva se analitički koeficijent otpora koji direktno ovisi o Reynoldsovom broju u slučaju Stokesovog strujanja:

$$C_D = \frac{24}{Re}. \quad (3.19)$$

4 PRIPREMA NUMERIČKE SIMULACIJE

4.1 Računarska dinamika fluida

Računarska dinamika fluida se u praksi koristi za rješavanje problema u kojima se javljaju fluidi u gibanju. Primjena računarske dinamike fluida omogućuje smanjene troškove i vrijeme razvoja te olakšava simulaciju različitih uvjeta koje je teško provesti u laboratoriju [6].

Računarska dinamika fluida provodi se u tri faze: predprocesiranje (*eng. Pre-processing*), numerička rješenja i simulaciju (*eng. Solver Execution*) i postprocesiranje tj. analizu i obradu rezultata (*eng. Post-processing*). Prva se faza sastoji od definiranja početnih uvjeta, definiranja domene te izrade 2D ili 3D numeričke mreže. Druga je faza definiranje numeričke metode. *OpenFOAM* rješavač te *Ansys Fluent* rješavač koriste metodu konačnih volumena. Metoda konačnih volumena jedna je od najčešće korištenih tehnika u računalnoj dinamici fluida. Metoda se temelji na diskretizaciji integralnog oblika jednadžbe za cijelu domenu u računalno razumljiv oblik. Posljednja faza računarske dinamike fluida su rezultati i obrada podataka. Vizualizacija i obrada podataka može biti u vanjskom softveru poput *ParaView-a*.

4.2 Mikroplastika

Problem mikroplastike jedan je od najvećih problema u svijetu. Plastika je jedan od najčešćih otpada pronađenih u oceanima, morima i velikim jezerima. Uobičajeno mikroplastika dolazi u svakakvim oblicima i veličinama koje su manje od pet milimetara.

Kao područje koje je u početku istraživanja, ne zna se mnogo o samoj mikroplastici i njenom utjecaju na prirodu. Za početak su određene terenske metode za prikupljanje uzoraka mikroplastike iz sedimenata, pijeska i površinske vode. Na temelju terenski i laboratorijski prikupljenih podataka moguće je aproksimirati količine mikroplastike u okoliš te njen utjecaj [7].

Mikroplastika dolazi iz raznih izvora većih plastičnih ostataka koji se s vremenom razgrađuju na manje komade. Osim same razgradnje većih komada, mikrozrnca su vrsta mikroplastike koje se koristi kao piling u proizvodima za njegu kože te nekim sredstvima za čišćenje i pastama za zube. Mikrozrnca prolaze kroz sustave za filtriranje vode i završavaju u oceanima i morima te pridonose povećanju količine mikroplastike. Mikroplastika se osim mikrozrnca dijeli i na mikrosfere, mikrokapsule i nanosfere/nanokapsule ovisno o veličini i obliku same mikroplastike.

S obzirom da su sfere česti oblik mikroplastike, u ovom će se radu istraživati opstrujavanje oko jedne takve čestice kako bi se detaljno analiziralo ponašanje ovakvih čestica. Za geometriju je

korištena čestice mikrosfere idealnog oblika promjera dva milimetra. Slika 4.1 prikazuje jednu mikrosferu.



Slika 4.1 Mikrosfera [7]

4.3 Izrada geometrije

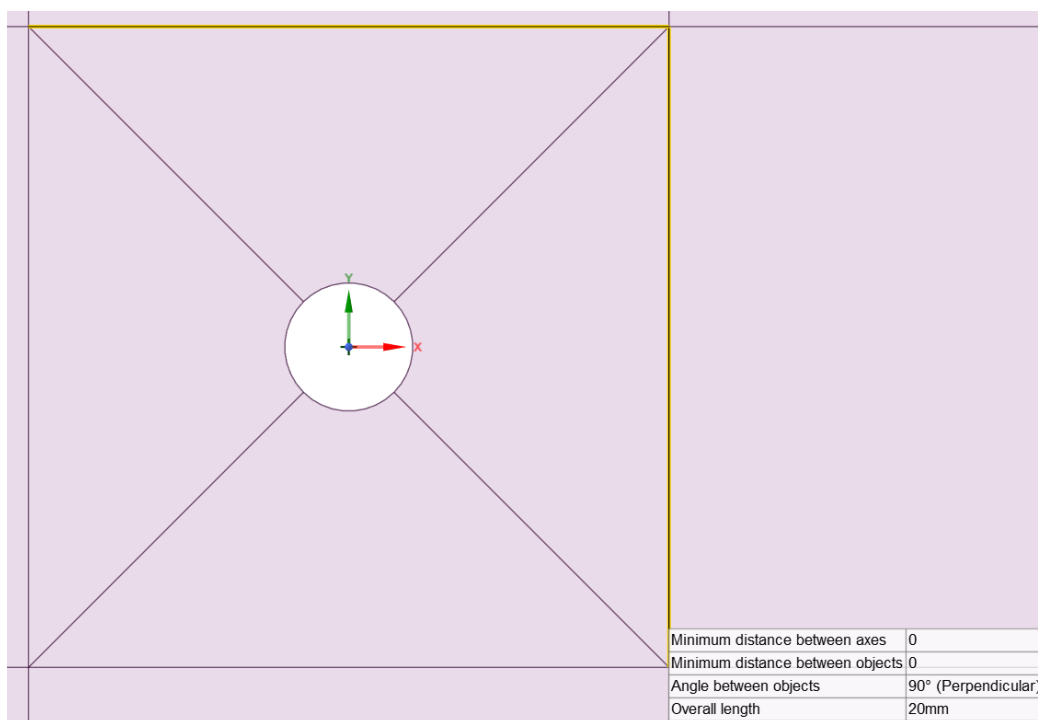
4.3.1 Izrada 2D geometrije

Dvodimenzionalna geometrija izrađena je uz pomoć alata *SpaceClaim* koji se nalazi u programskom paketu *Ansys*. *SpaceClaim* jednostavan je paket za modeliranje i pripremu geometrije te uređivanje gotovih geometrija i pojednostavljenje istih za simulacije.

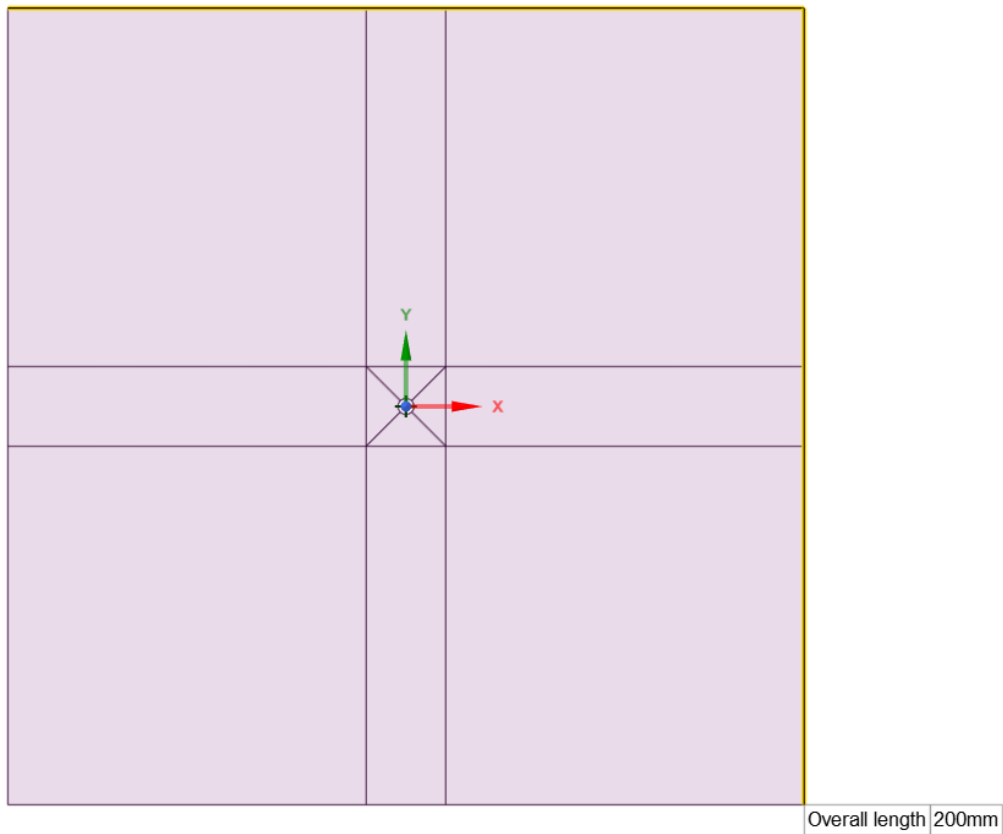
Za početak je izrađen kvadrat dimenzija 0,1 x 0,1 m koji predstavlja domenu u kojoj će se nalaziti čestica. Kvadrat je napravljen kao *Surface Body*. Sljedeći je korak bio *Sketch* čestice mikroplastike koja je u dvodimenzionalnom sustavu krug promjera dva milimetra. Iz kvadrata je zatim u središtu oduzeta sfera te česticu predstavlja šupljina dok je puni dio kvadrata fluid.

Kako bi se mogla napraviti strukturirana mreža potrebno je podijeliti domenu na dodatne dijelove. Podjela je napravljena tako da se unutar domene u centru napravio manji kvadrat dimenzija 10 x 10 mm. Iz središta kruga povučene su crte prema kutevima kvadrata te zatim vodoravno ili okomito do ruba domene. Cjelokupna domena podijeljena je na 12 područja (*eng. surface*) koja

međusobno dijele podatke o strujanju fluida. Slike 4.2 i 4.3 prikazuju redom podjelu domene na manje dijelove i sliku cjelokupne domene.



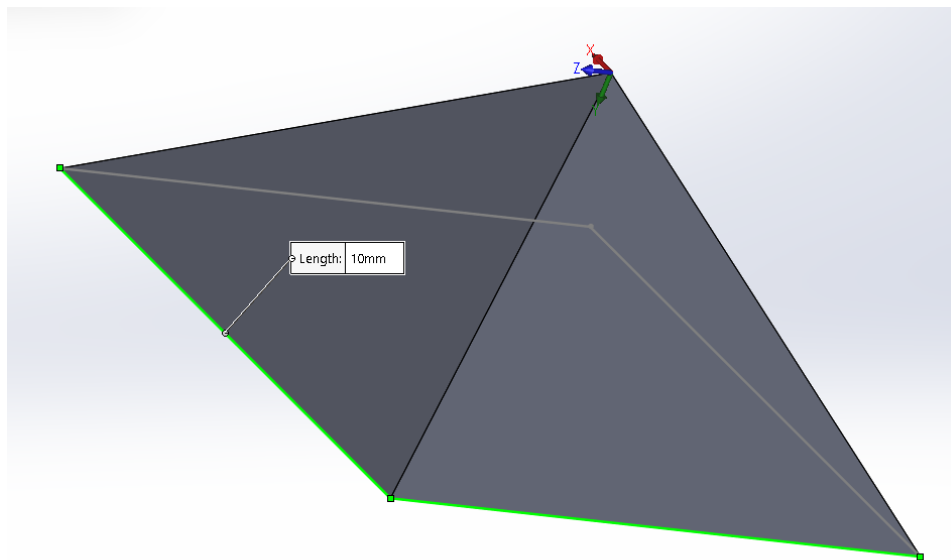
Slika 4.2 Podjela domene



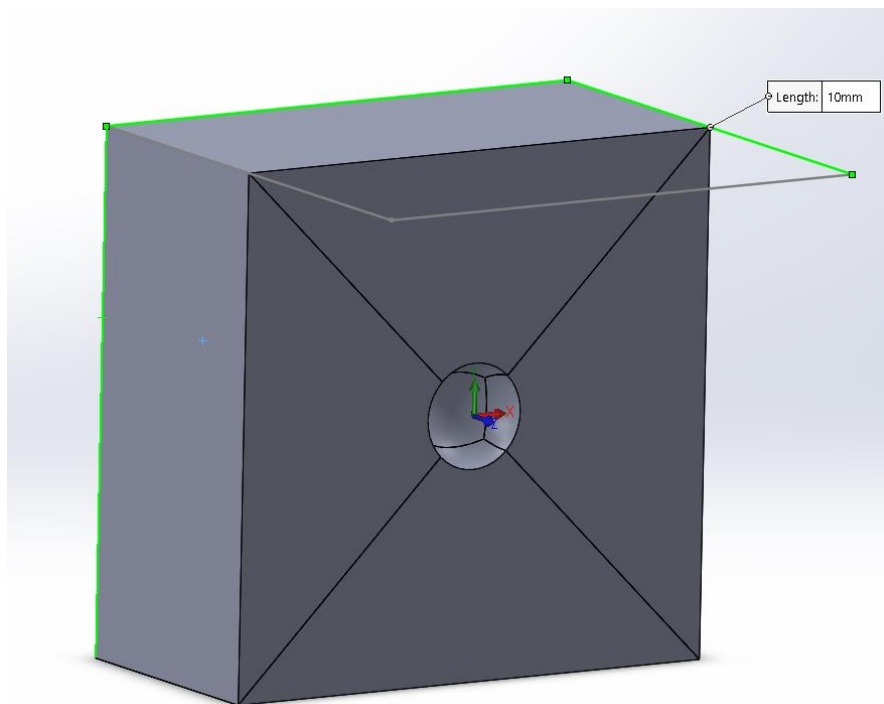
Slika 4.3 Izgled cjelokupne domene

4.3.2 Izrada 3D geometrije

Trodimenzionalna geometrija napravljena je uz pomoć softvera SolidWorks koji služi za modeliranje čvrstih tijela. Kako bi trodimenzionalna geometrija imala sličnu podjelu elemenata u mreži kao i dvodimenzionalna geometrije potrebno je naprednije modeliranje tijela te je u tu svrhu korišten SolidWorks. S obzirom da se u okolini čestice mikroplastike kod dvodimenzionalne domene nalaze četiri trokuta od kojih je oduzet vrh s obzirom na dimenziju čestice, sličan pristup se koristio kod trodimenzionalne domene. Središnja kocka koja je dimenzija 0,1 x 0,1 x 0,1 m sastoji se od šest jednakih piramida koje se spajaju u zajedničkom vrhu, a u tom vrhu se nalazi čestica koja je kao rupa oduzeta od čvrstih piramida. Piramida je napravljena uz pomoć opcije *Loft* te je potom uz pomoć opcije *Circular Pattern* napravljena kocka. Opcijom *Revolved Cut* napravljena je rupa u obliku sfere u zajedničkom vrhu piramida. Početna piramida te centralna kocka s oduzetom česticom nalaze se na slikama 4.4 i 4.5.

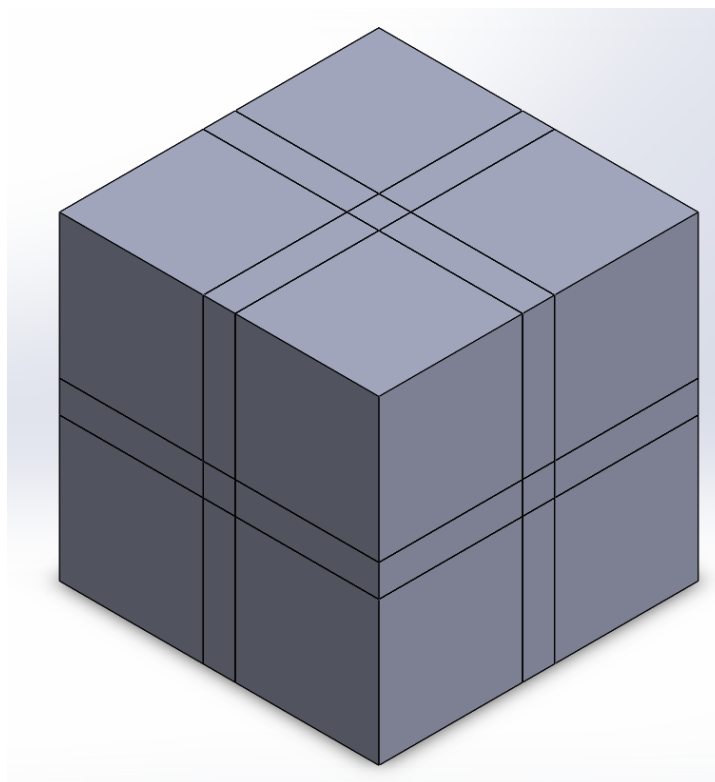


Slika 4.4 Piramida koja tvori manju kocku



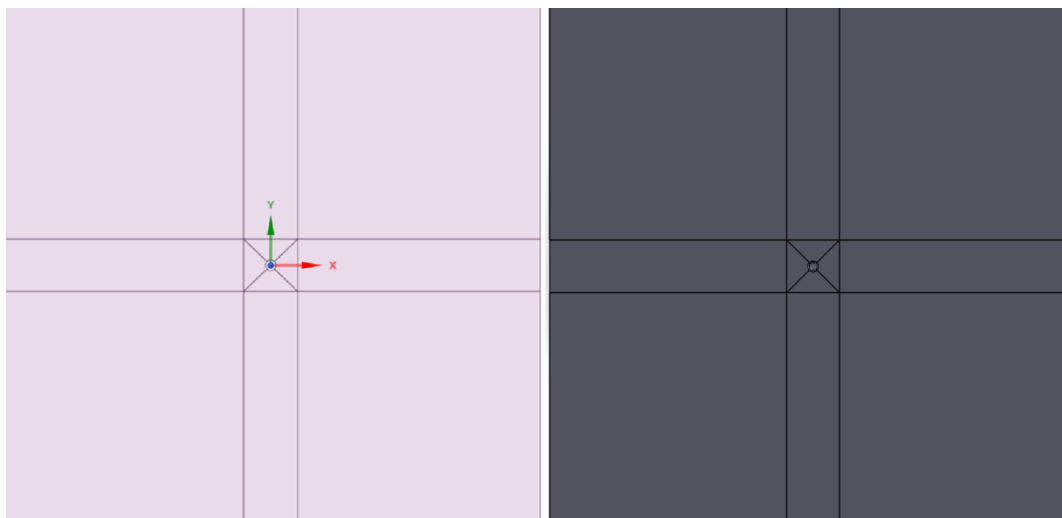
Slika 4.5 Središnja kocka s oduzetom sferom u središtu

Nakon izrade središnje kocke istih dimenzija kao kod dvodimenzionalne domene krenula je izrada ostatka domene odgovarajućim kvadrima uz pomoć opcije *Circular Pattern*. Konačni izgled domene nalazi se na slici 4.6.



Slika 4.6 Konačni izgled domene izvana

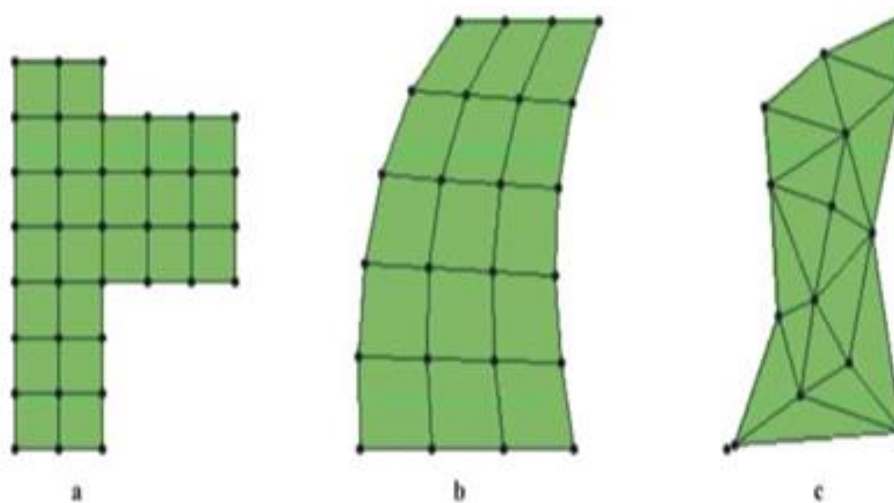
Kako bi mreže u konačnici bile približno jednake cilj je bio izraditi podjednake geometrije za dvodimenzionalnu domenu i trodimenzionalnu domenu. Usporedba središnjeg presjeka trodimenzionalne domene jednaka je dvodimenzionalnoj domeni te je stoga moguće nastaviti s izradom mreže. Usporedbu središnjeg presjeka trodimenzionalne domene i dvodimenzionalne domene prikazana je na slici 4.7.



Slika 4.7 2D (lijevo) vs 3D (desno)

4.4 Izrada numeričke mreže

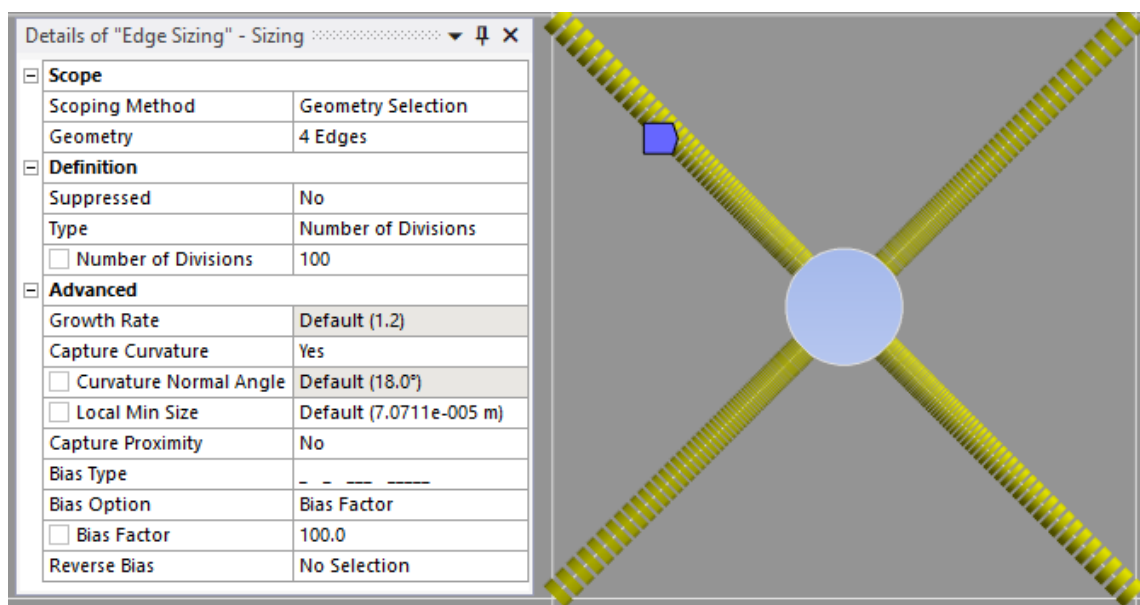
Strukturirana i nestrukturirana mreža dvije su osnovne klase diskretizacije prostora. Izbor i adaptacija mreže bitan je korak u cjelokupnoj provedbi numeričke simulacije [8]. U ovom je zadatku za mrežu odabrana nestrukturirana mreža. Nestrukturirana mreža u 2D slučaju jest pravokutna mreža, dok je u 3D slučaju heksahedralna. Na slici 4.8 prikazani su neki tipovi dvodimenzionalne numeričke mreže.



Slika 4.8 Tipovi 2D mreže: a. regularna ortogonalna, b. neregularna strukturirana, c. nestrukturirana [8]

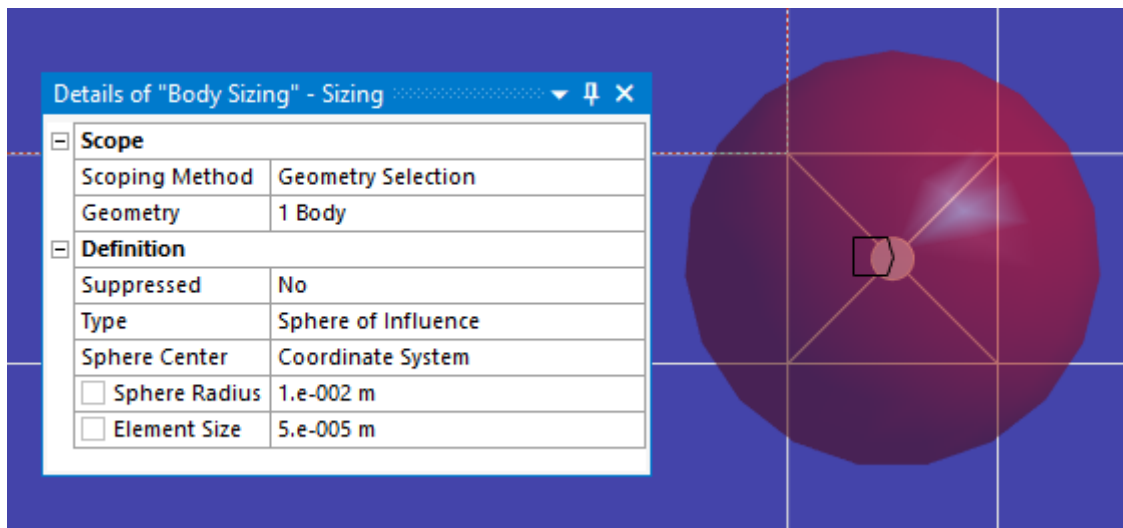
4.4.1 Izrada 2D mreže

Uz pomoć programskog paketa *Ansys* izrađena je mreža u modulu *Mesh*. Modul je prilagođen za izradu jednostavnih i složenih mreža za 2D i 3D slučajeve. S obzirom da se u zadatku radi o opstrujavanju čestice mikroplastike za parametar *Physics Preference* namješten je *CFD*. Kako bi se napravila kvalitetna nestrukturirana mreža u okolini čestice mikroplastike korišteno je nekoliko opcija koje nudi modul *Mesh*. Prva korištena opcija je *Edge Sizing* te parametri unutar opcije: *Number of Divisions* i *Bias*. Parametrom *Number of Divisions* namješten je broj elemenata na rubu, dok je opcijom *Bias* namješteno postepeno povećanje elemenata s obzirom na udaljenost od same sfere. Naime gušća je mreža napravljena u bližoj okolini same čestice kako bi se postignuo bolji gradijent rezultata s obzirom da čestica predstavlja zid. *Edge Sizing* je korišten na svim potrebnim rubovima ukupno četiri puta. Korišteni parametri unutar opcije *Edge Sizing* te njihov položaj prikazani su na slici 4.9.



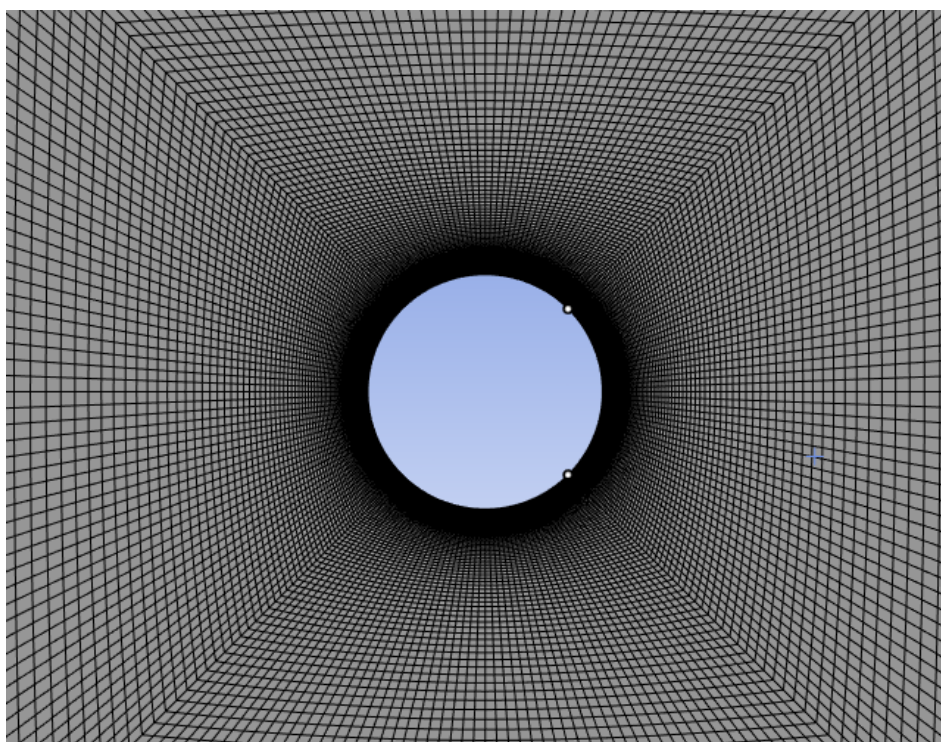
Slika 4.9 Prva korištena opcija: *Edge sizing*

Kako bi se u konačnici sve površine spojile te tvorile pravilnu mrežu iskorištena je opcija *Face Meshing* koja osigurava da su apsolutno svi elementi četverokuti. Kako bi se dodatno ugustila mreža u bližoj okolini sfere napravljeno je dodatno ugušćenje uz pomoć opcije *Body Sizing* te parametra *Sphere of Influence*. Ovim je parametrom napravljena veća sfera radijusa 0,01 m sa središtem u centru čestice. Veličina elemenata zadana je na 0,00005 m. Prikaz korištene opcije nalazi se na slici 4.10.

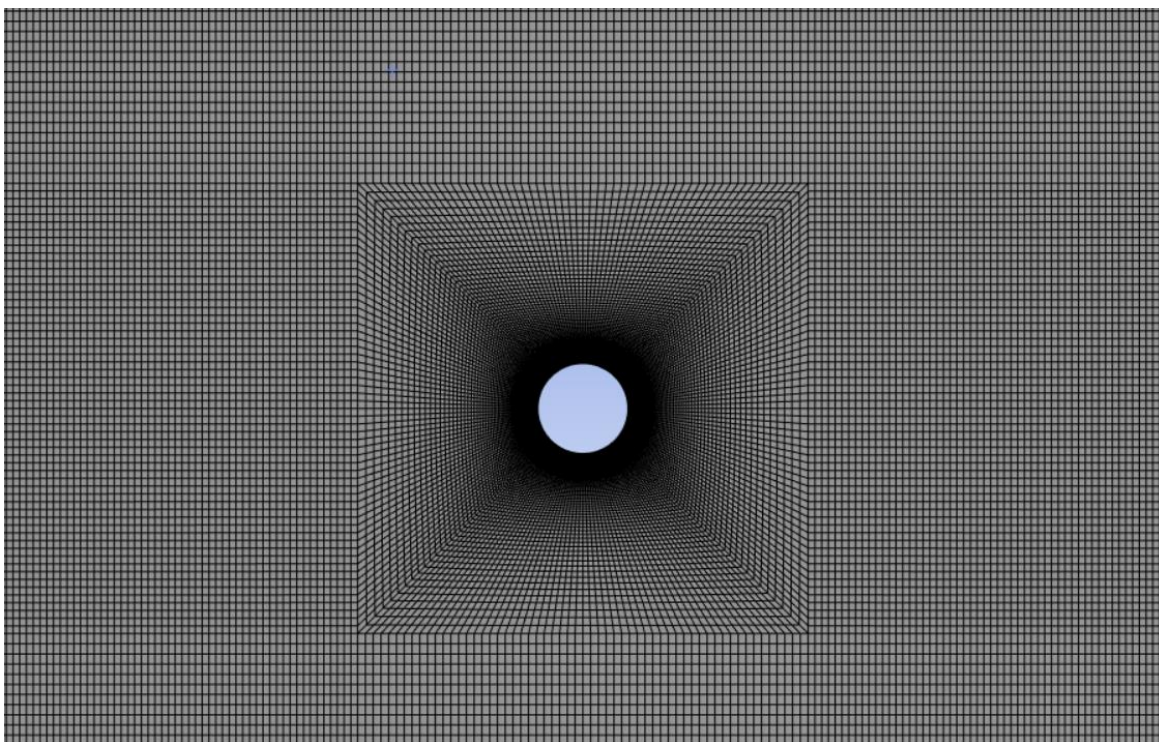


Slika 4.10 Šesta korištena opcija: Body Sizing

Konačna je mreža napravljena od 321,200 elemenata te 322,432 čvora. Svi su elementi četverokuti. S obzirom na zadane parametre mreža je poprilično gusta što bi trebalo osigurati bolje rezultate. Konačna je mreža potom izvezena u obliku *.msh* kako bi se nadalje mogla koristiti. Slike 4.11 i 4.12 prikazuju konačni izgled mreže u blizini čestice te u okolici unutarnjeg kvadrata.



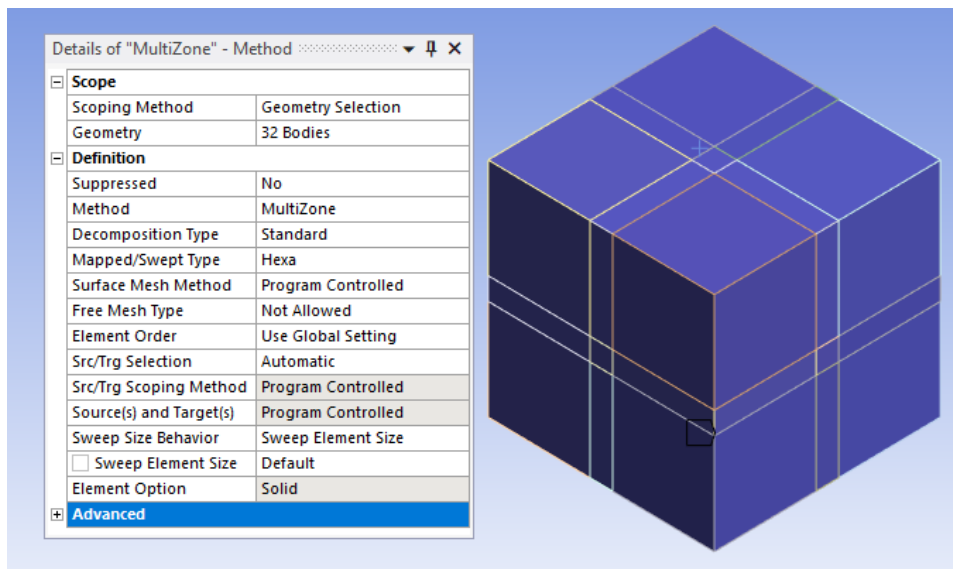
Slika 4.11 Mreža u blizini čestice



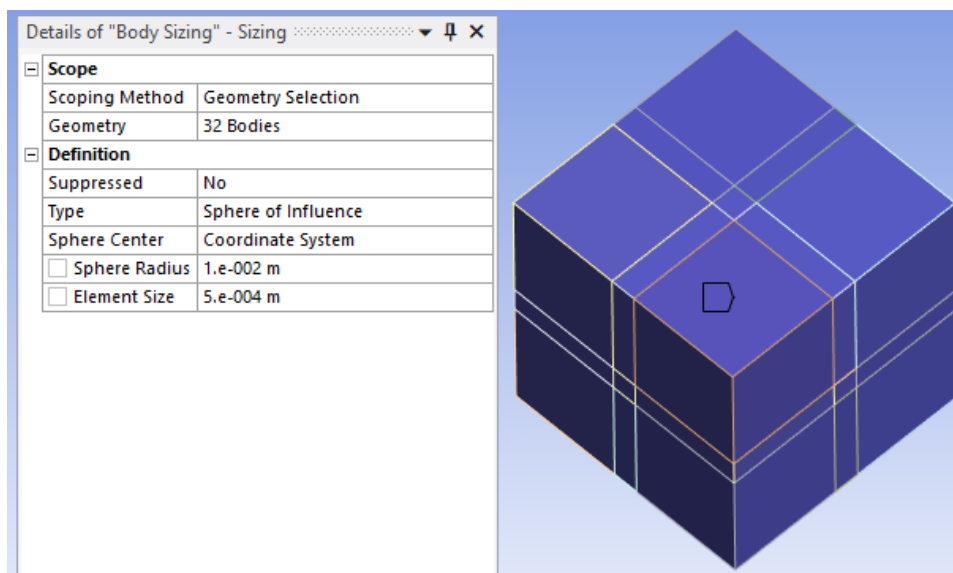
Slika 4.12 Mreža u okolici unutarnjeg kvadrata

4.4.2 Izrada 3D mreže

Kako bi se mogla izraditi mreža za trodimenzionalnu domenu prvotno je bilo potrebno napraviti uvoz domene u programski paket *Ansys* u *.step* obliku. Takva je domena zatim provjerena uz pomoć alata *SpaceClaim* te zatim spojena s *Mesh* modulom. S obzirom na kompliciraniju trodimenzionalnu geometriju za stvaranje mreže korištene su dvije opcije. Na samom početku za parametar *Physics Preference* namješten je *CFD* dok je veličina elemenata namještena na 0,01 m. Kako bi se mogla napraviti nestrukturirana mreža heksaedara korištena je opcija *MultiZone*. Odabirom svih tijela osigurano je stvaranje što više pravilnih heksaedara. Nakon opcije *MultiZone* korištena je opcija *Body Sizing* uz parametar *Sphere of Influence*. Centar sfere nalazi se u centru same čestice, radijus sfere iznosi 0,01 m dok je veličina elemenata unutar sfere zadana na 0,0005 m. Slike 4.13 i 4.14 prikazuju navedene opcije.

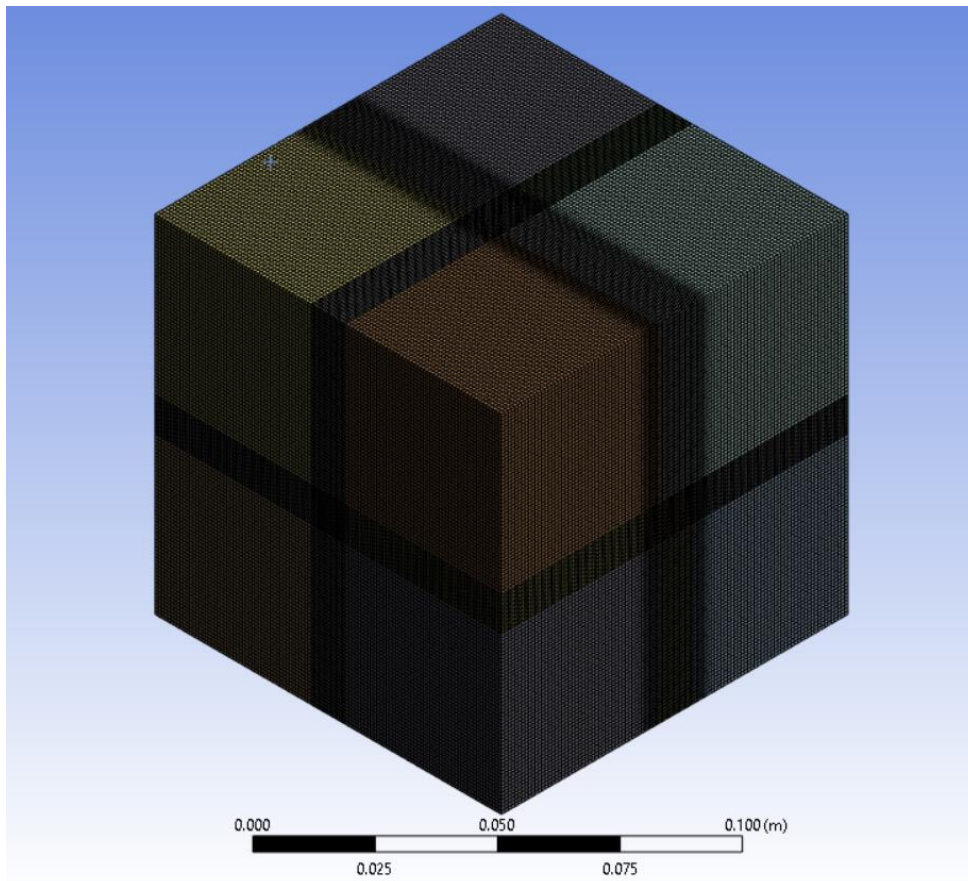


Slika 4.13 Prva korištena opcija: MultiZone

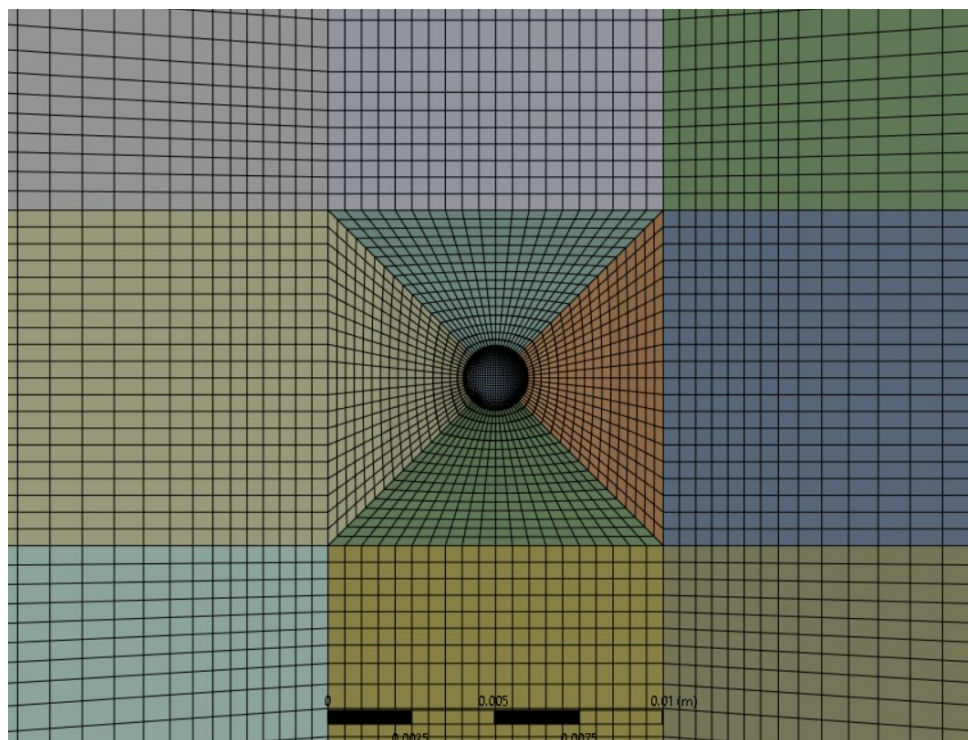


Slika 4.14 Druga korištena opcija: Body Sizing

Konačna 3D mreža sastoji se od 1787,200 elemenata i 1832,416 čvorova. Konačna mreža nije potpuno identična kao i 2D mreža no elementi unutar mreže zadovoljavajući su za daljnji rad. Konačni izgled 3D mreže kao i središnji presjek 3D mreže vidi se na slikama 4.15 i 4.16.



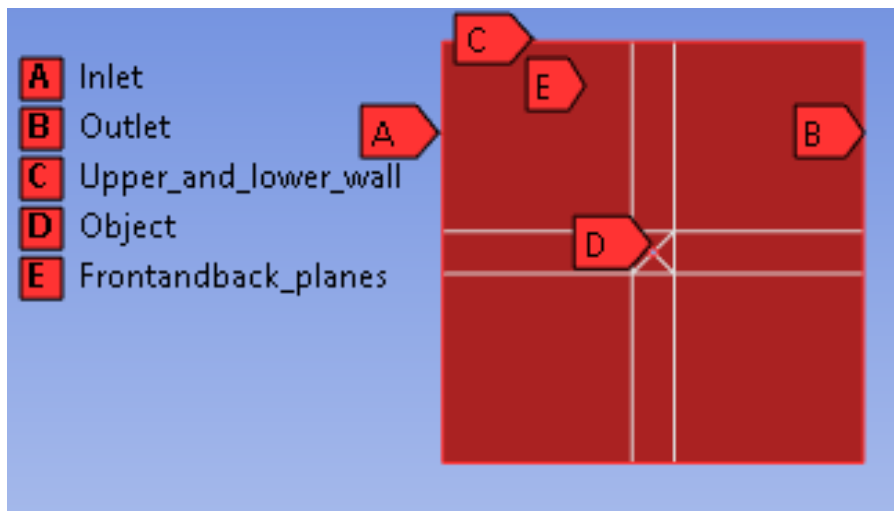
Slika 4.15 Konačna 3D mreža



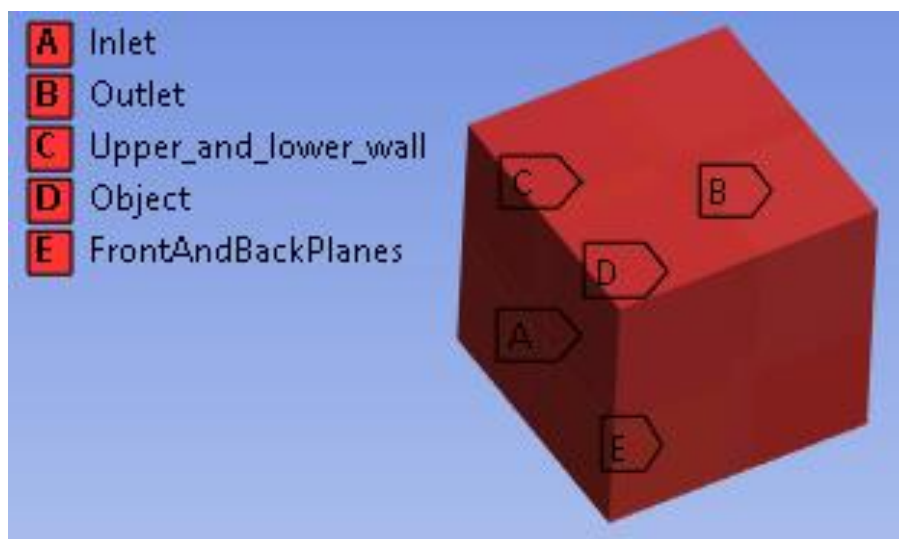
Slika 4.16 Izgled 3D mreže u središnjem presjeku

4.4.3 Nazivi linija/ploha

Kako bi se kod 2D i 3D numeričke simulacije mogli zadati odgovarajući rubni i početni uvjeti potrebno je na određene linije/plohe zadati nazive (*eng. Named Selections*). Kako ne bi došlo do zabune u zadavanju uvjeta za 2D i 3D domenu zadana su ista imena na odgovarajuće linije/plohe. Imena koja su zadana su sljedeća: *Inlet*, *Outlet*, *Upper_and_lower_wall*, *Object* i *Frontandbackplanes*. Zadana imena na 2D i 3D domeni mogu se vidjeti na slikama 4.17 i 4.18.



Slika 4.17 Imena zadana na linijama/plohama 2D domene



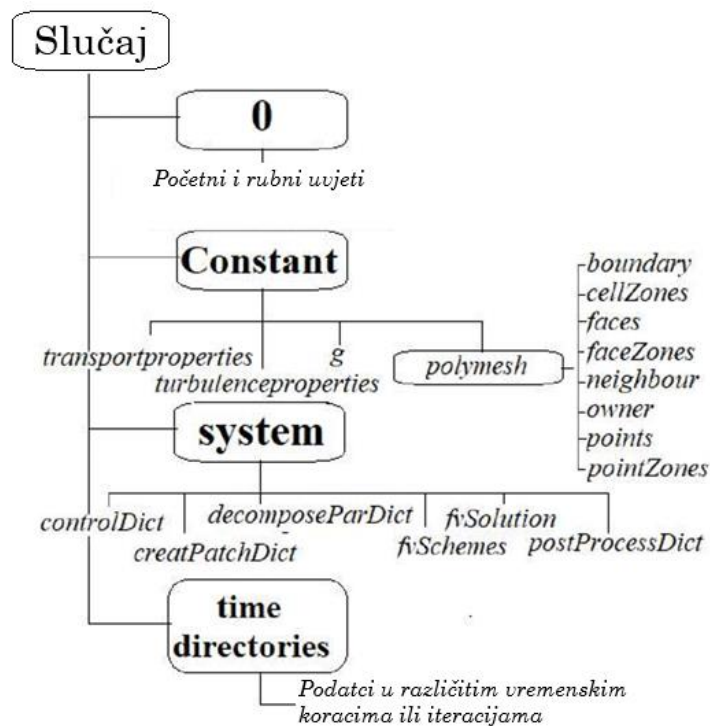
Slika 4.18 Imena zadana na plohama 3D domene

5 POSTAVLJANJE SLUČAJA U OPENFOAM-U

5.1 OpenFOAM slučaj nerotirajuće čestice

OpenFOAM (eng. *Open Field Operation and Manipulation*) je alat koji omogućuje izradu simulacija strujanja tekućina, prijenosa topline, turbulentnog strujanja, kemijskih reakcija, akustike itd. Sam alat je izrađen u programskom jeziku C++. Korisnici mogu mijenjati izvorni kod i prilagođavati program ukoliko je potrebno. Softver koristi metodu konačnih volumena za diskretizaciju jednadžbi. S obzirom da sam alat nema korisničko sučelje, podatci i postavke se mijenjaju u datotekama. Prilagođavanje datoteka se je u ovom radu izvodilo uz pomoć programskog jezika Python. Za pokretanje *OpenFOAM-a* potreban je *Linux* operativni sustav kojim se upravlja preko konzole ili korištenjem *bash* skripti. Vizualizacija rješenja dobivenih iz *OpenFOAM-a* radi se u programu *ParaView*.

U konkretnom slučaju ovog problema mapa slučaja (eng. *Case folder*) sastoji se od tri podmape. Podmapa 0 se sastoji od inicijalnih uvjeta i rubnih uvjeta na prethodno navedenim linijama/plohama. U samoj mapi se nalaze datoteke U i p. U podmapi constant nalaze se podatci o tipu rješavanja problema, podatci o fluidu te podmapa polyMesh koja sadrži sve podatke o mreži. Unutar mape system nalaze se postavke simulacije i načini rješavanja jednadžbi. Nakon samog proračuna moguće je da mapa slučaja sadrži i podmapu postProcessing u kojoj se nalaze podaci u vremenskim koracima ili iteracijama. Tijekom samog proračuna *OpenFOAM* stvara podmape sa vremenskim koracima ili iteracijama koje je kasnije moguće vizualizirati. Mapa slučaja prikazana je na slici 5.1.



Slika 5.1 Mapa slučaja [9]

S obzirom da je u ovom slučaju laminarno strujanje u direktoriju 0 nalaze se samo datoteke p i U koje opisuju rubne uvjete za tlak i brzinu.

U datoteci p postavljen atmosferski tlak po cijeloj domeni kao inicijalni uvjet. Za liniju/plohu *inlet* i krug/sferu *object* zadan je uvjet *zeroGradient*. Rubni uvjet *zeroGradient* govori kako se na tom određenom bloku ne zbiva promjena u tlaku, takav rubni uvjet najčešće se koristi za opisivanje zidova. Na liniju/plohu *outlet* zadan je rubni uvjet *fixedValue*. Rubni uvjet *fixedValue* služi za zadavanje konstantne vrijednosti tlaka na željenom području. Za liniju/plohu *upper_and_lower_wall* zadan je uvjet *symmetry*. Za plohe *frontAndBackPlanes* ponovno je zadan uvjet s obzirom na koju se simulaciju odnosi, uvjet je varirao između *empty* za 2D slučaj i *symmetry* za 3D slučaj.

Za datoteku U bilo je potrebno namjestiti inicijalnu brzinu fluida u kompletnoj domeni kao i na liniji/plohi *inlet*. Kako bi se odredila odgovarajuća brzina korišten je izračun preko Reynoldsovog broja uz pomoć jednadžbe 5.1 koji iznosi $Re = 0,5$. Sam promjer čestice poznat je iz prethodnog definiranja geometrije te iznosi $D = 2 \text{ mm} = 0,002 \text{ m}$ dok je za fluid odabrana voda viskoziteta $\nu = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Konačna brzina definirana je jednadžbom 5.2:

$$U = Re \cdot \frac{\nu}{D}, \quad (5.1)$$

$$U = 0.5 \cdot \frac{1 \cdot 10^{-6}}{0.002} = 0.00025 \frac{\text{m}}{\text{s}}. \quad (5.2)$$

Brzina opstrujavanja u okolici čestice zadana je u smjeru x-osi s obzirom da se poklapa sa smjerom od *inleta* prema *outletu*. S obzirom da se *object* (sfera) smatra zidom bilo je potrebno namjestiti *noSlip* uvjet. Naime, *noSlip* uvjet govori kako je brzina na samoj stijenci zida jednaka nuli te udaljavanjem od stijenke raste. *FrontAndBackPlanes* te *upper_and_lower_wall* postavljeni su identično kao i u datoteci *p*. *Symmetry* uvjet zadan je iz razloga kako se domena ne bi ograničavala i stvarala neka vrsta tunela, već da bi domena bila otvorena te modelirala strujanje oko čestice mikroplastike u vodi/moru koje je eksponencijalno većih dimenzija. Tablica 5.1 prikazuje postavljene rubne uvjete u datotekama *p* i *U* za 2D/3D slučaj.

Tablica 5.1 Rubni uvjeti za *U* i *p* u 2D/3D slučaju

	Rubni uvjeti za <i>p</i>	Rubni uvjeti za <i>U</i>
<i>Inlet</i>	<i>zeroGradient</i>	<i>fixedValue (0,00025 0 0)</i>
<i>Outlet</i>	<i>fixedValue (0)</i>	<i>zeroGradient</i>
<i>Object</i>	<i>zeroGradient</i>	<i>noSlip</i>
<i>FrontAndBackPlanes</i>	<i>empty/symmetry</i>	<i>empty/symmetry</i>
<i>upper_and_lower_wall</i>	<i>symmetry</i>	<i>symmetry</i>

U lokalnom Ubuntu sustavu instaliran je OpenFOAM verzija 10 [10]. Kako bi se u *OpenFOAM* učitala mreža, koristi se funkcija *fluentMeshToFOAM/fluent3DMeshToFOAM* ovisno radi li se o 2D ili 3D mreži. *OpenFOAM* je potom automatski generirao direktorij pod nazivom *polyMesh* u postojećoj podmapi *constant*. Unutar direktorija *polyMesh* bilo je potrebno otvoriti datoteku pod nazivom *boundary*. U datoteci *boundary* trebalo je provjeriti nekoliko podataka, u 2D slučaju za *frontAndBackPlanes* potrebno je bilo namjestiti uvjet *empty*, dok je u 3D slučaju za prednju i stražnju plohu kocke postavljen uvjet *symmetry*. Slika 5.2 prikazuje različite postavke za 2D i 3D domenu.

```

frontAndBackPlanes
{
    type            empty;
    inGroups        List<word> 1(empty);
    nFaces          96560;
    startFace       97082;
}

frontandbackplanes
{
    type            symmetry;
    inGroups        List<word> 1(symmetry);
    nFaces          28800;
    startFace       5377680;
}

```

Slika 5.2 2D slučaj: empty (gore), 3D slučaj: symmetry (dolje)

Ostali su dijelovi domene imali jednako namještene uvjete u oba slučaja. Za *inlet* i *outlet* liniju/plohu odabran je uvjet *patch*, za *upper_and_lower_wall* liniju/plohu odabran je uvjet *symmetry* te za krug/sferu *object* (sferu) odabran je uvjet *wall*.

U podmapi constant uz direktorij polyMesh nalaze se i datoteke pod nazivima transportProperties i turbulenceProperties. Unutar datoteke transportProperties bilo je potrebno podesiti vrstu fluidu kroz transportni model: *Newtonian* te viskozitet fluida u kojemu se mikročestica nalazi. U datoteci turbulenceProperties uz pomoć prethodno navedenog sučelja odabrana je laminarna simulacija. Opisano je prikazano na slici 5.3.

```

transportModel  Newtonian;

nu              1e-6;

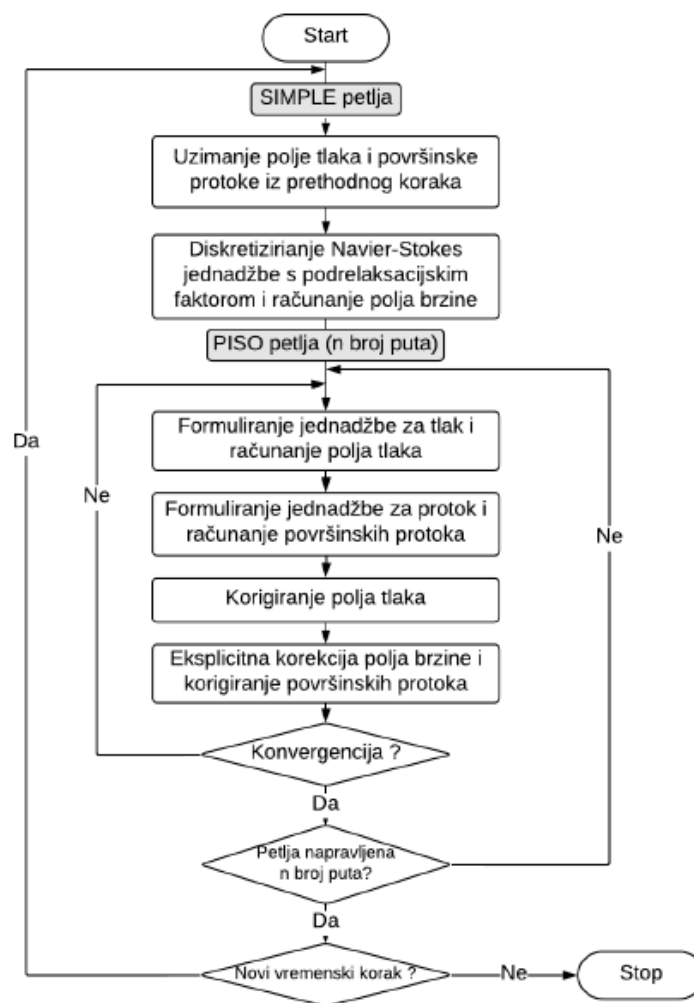
simulationType laminar;

```

Slika 5.3 Postavke fluida i vrste simulacije

Posljednja podmapa u kojoj je bilo potrebno namjestiti postavke simulacije naziva se system. U system podmapi nalaze se tri datoteke: fvSchemes, fvSolution i controlDict. U ovim datotekama podešavaju se metode kojima se rješava sam problem, kontrola reziduala, vremenski korak, krajnje vrijeme simulacije, rješavač itd. Dok su datoteke fvSchemes i fvSolution kopirane iz tutoriala za pimpleFoam/laminar slučajeve. U datoteci fvSolution dodatno su postroženi reziduali za tlak i brzinu kako se simulacija ne bi zaustavila prije konačnog vremenskog koraka. Vrijednost postroženih reziduala iznosi $1 \cdot 10^{-7}$. Datoteka fvSchemes definira numeričke sheme korištene za diskretizaciju različitih pojmova u parcijalnim diferencijalnim jednadžbama koje se rješavaju. Za fvSchemes korištene su postavke iz službenih tutoriala za 2D cilindar [11]. U datoteci controlDict je potrebno napraviti nekoliko izmjena kako bi simulacija bila uspješno provedena.

U datoteci controlDict namješten je rješavač pimpleFoam koji se koristi za simulaciju nestacionarnih strujanja fluida. PimpleFoam bazira se na PISO-SIMPLE algoritmu koji omogućava rješavanje problema kroz vrijeme te dodatnim podešavanjem parametara omogućava bolju konvergenciju. Kroz jedan vremenski korak na samom se početku traži stacionarno rješenje primjenom podrelaksacije (SIMPLE algoritam) te se nakon pronalaska stacionarnog rješenja ulazi u PISO petlju. Nakon konvergencije svih eksplicitnih dijelova jednadžbe kreće se na sljedeći vremenski korak te tako do konvergencije kompletnog slučaja [12]. Prikaz rada PIMPLE algoritma nalazi se na slici 5.4.



Slika 5.4 Rad PIMPLE algoritma [12]

Vrijeme zaustavljanja nestacionarne simulacije podešeno je na 100 sekundi. Vremenski korak u datoteci controlDict automatski se ispravlja uz pomoć CFL uvjeta. Numerički uvjet koji se primjenjuje u simulacijama strujanja fluida kako bi se osigurala stabilnost i konstantnost krajnjeg numeričkog rješenja naziva se CFL uvjet po znanstvenicima Courant-u, Fridrichs-u i Lewy-u. S obzirom na zadovoljavajući vremenski korak podešene su vrijednosti CFL uvjeta u 2D i 3D

slučaju. Vrijednosti Courantovog broja unose se u retku s nazivom *maxCo*. U 2D slučaju vrijednost Courantovog broja iznosi 0,001, dok je u 3D slučaju iznosi 1. Jednadžba za izračun CFL uvjeta navedena je pod brojem 5.3:

$$CFL = \frac{U\Delta t}{\Delta x}. \quad (5.3)$$

Gdje su: Δt – vremenski korak simulacije,
 Δx – prostorni korak u mreži.

5.2 OpenFOAM slučaj rotirajuće čestice

Jedina razlika kod postavljanja slučaja rotirajuće čestice nalazi se u podmapi 0. U datoteci U potrebno je podesiti rotaciju čestice koja je definirana pod imenom *Object*. Kako bi se postavila rotacija zida potrebno podesiti tip *rotatingWallVelocity*. Kako bi se definirala rotacija potrebno je zadati centar rotacije, os oko koje rotira i kutnu brzinu rotacije u rad/s. Kako bi se mogao jasno vidjeti utjecaj rotacije na rezultate odabrano je pet kutnih brzina rotacije: 1, 0,1, 0,01, 0,001 te $4 \cdot 10^{-9}$ rad/s. Zadnja brzina rotacije odgovara iznosu dobivenom izjednačavanjem sila na sferi. Prikaz postavljanja rotacije čestice za 3D slučaj nalazi se na slici 5.5.

```
object
{
    type      rotatingWallVelocity;
    origin    (0 0 0);
    axis      (0 0 1);
    omega     0.000000004;
}
```

Slika 5.5 Podešavanje rotacije čestice

5.3 Pokretanje simulacije na superračunalu Bura

Pokretanje *OpenFOAM* simulacija izvršeno je na superračunalu Bura. Sama simulacija pokrenuta je na Clusteru. Cluster se može definirati kao skup usko povezanih računala koje rade zajedno tako da se mogu gledati kao jedno računalo. Uobičajeno spajanje računala provodi se LAN-om. Svrha klastera je povećanje performansi koje pruža jedno računalo. Računalni zadaci se unutar clustera dijele na više čvorova te zatim svaki čvor ima vlastiti broj raspoloživih procesora. Burin Cluster sastoji se od grozda računala kojeg čine 288 računalnih čvorova. Svaki računalni čvor ima po 2 Xeon E5 procesora. Ukupno je dostupno 6912 procesorskih jezgri. Svaki odvojeni čvor ima 64

GB memorije i 320 GN diskovnog prostora. Sveukupno cluster Bure ima 18 TB memorije i 95 TB diskovnog prostora. Prikaz dijela Clustera Bure nalazi se na slici 5.6.



Slika 5.6 Superračunalo Bura

Kako bi se kompletan slučaj mogao pokrenuti na Buri potrebno je izraditi odgovarajuću SLURM skriptu. Uz SLURM skriptu u podmapu System potrebno je dodati DecomposeParDict. DecomposeParDict je datoteka koja daje naredbu na koliko će se subdomena podijeliti ukupan slučaj. Slurm (Simple Linux Utility for Resource Management) je vrsta otvorenog sustava koji služi za upravljanje resursima te raspoređivanje poslova. Ovakav sustav se koristi u okruženjima visokih performansi kako bi bila učinkovitija alokacija i upravljanje računalnim resursima.

U slurm skripti run.sh definira se broj čvorova i broj zadataka po čvoru, a njihovim umnoškom se dobiva broj procesora korištenih u samom proračunu. Po svakom procesoru zadaje se i memorija koju isti koristi. Može se namjestiti i vremenski period nakon kojeg će simulacija biti zaustavljena, osnovne stvari poput naziva simulacije i same output datoteke te solvera. Koristi se MPI model. Prikaz navedene SLURM skripte nalazi se na slici 5.7.

```
#!/bin/bash
#SBATCH --job-name=3Dsphere256
#SBATCH --time=2-00:00:00
#SBATCH --nodes=16
#SBATCH --ntasks-per-node=16
#SBATCH --mem-per-cpu=2048MB
#SBATCH --output=3Dsphere256-%j.out
#SBATCH --partition=computes_thin
#SBATCH --exclusive

solver=pimpleFoam

sed -i "s/numberOfSubdomains.*[0-9][0-9]*/numberOfSubdomains $SLURM_NTASKS;/g"
system/decomposeParDict
decomposePar -fileHandler collated > log.decomposePar

mpirun -np $SLURM_NTASKS $solver -parallel -fileHandler collated > log.pimple 2>&1
```

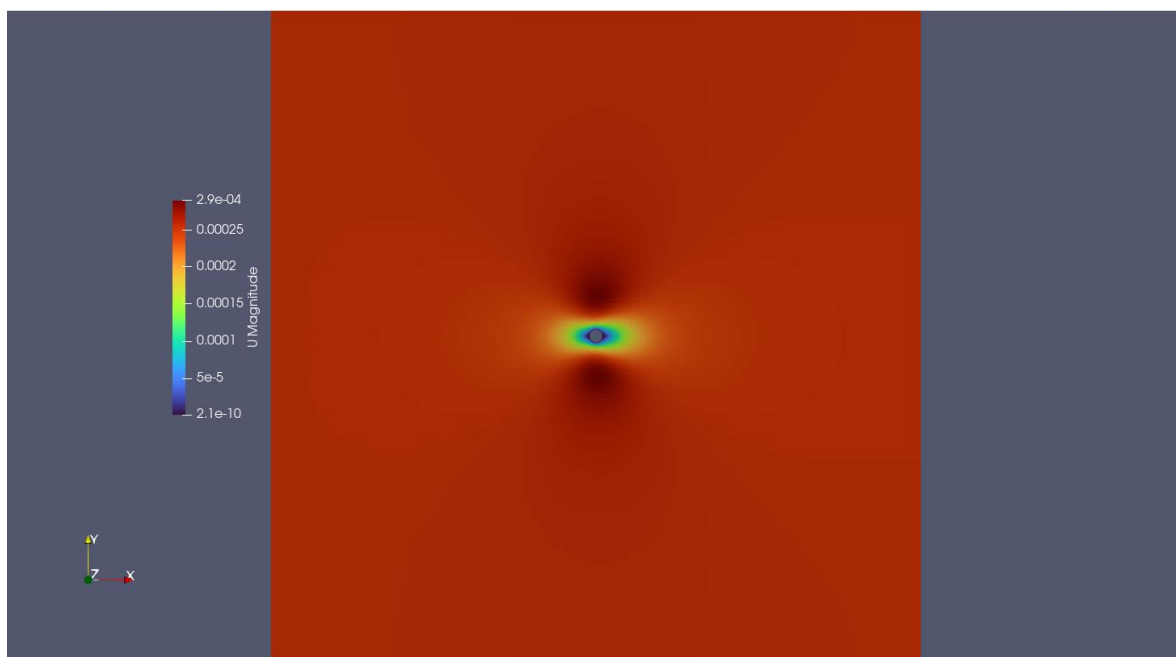
Slika 5.7 Slurm skripta

6 ANALIZA OPENFOAM REZULTATA

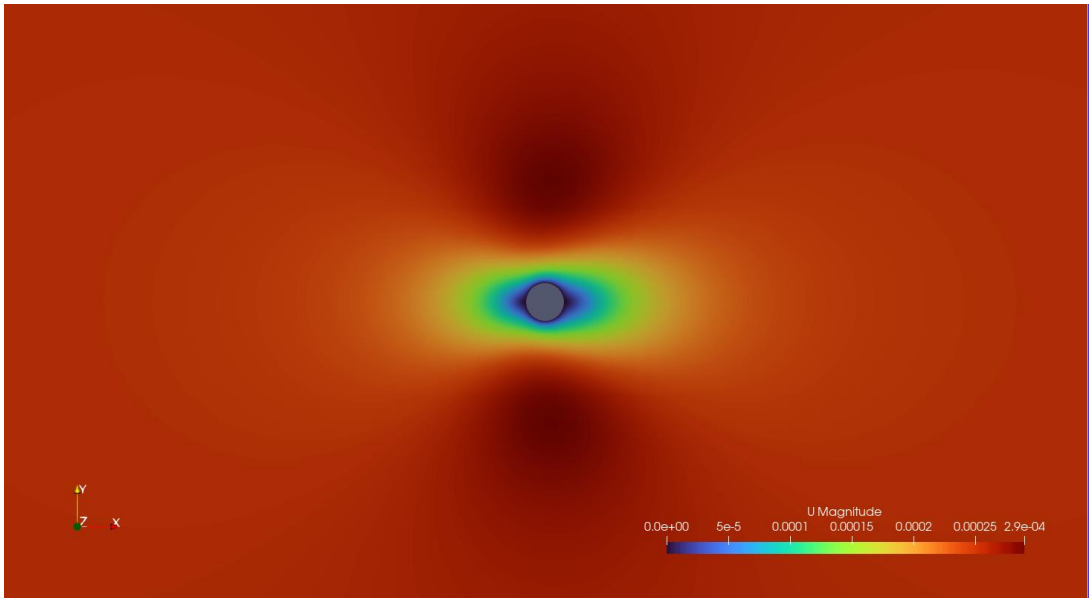
6.1 Rezultati nerotirajuće čestice u OpenFOAM-u

Nakon završetka simulacije kreće korištenje softvera *ParaView*. *ParaView* je softver za vizualizaciju podataka, koristi se za vizualizaciju simulacije strujanja fluida, analizu podataka i različite znanstvene vizualizacije.

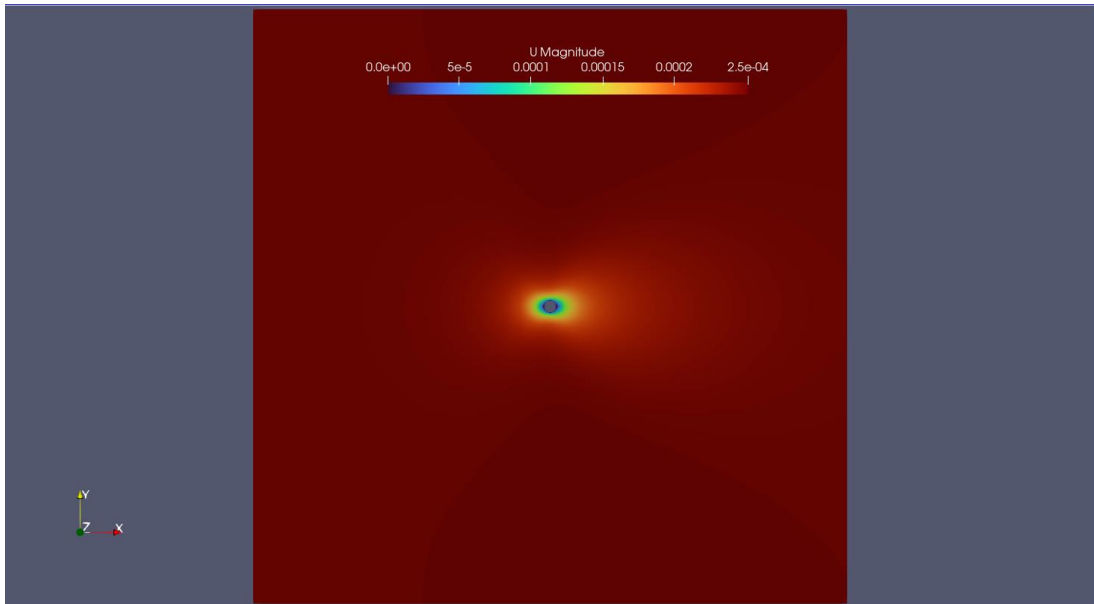
Iako je kroz datoteku `controlDict` omogućen ispis podataka svakih pet sekundi simulacije te se može vidjeti kako je kroz iteracije teklo usavršavanje rezultata u domeni, jedini rezultat koji se promatra je krajnji vremenski trenutak. Na slikama 6.1 i 6.2 nalazi se magnituda brzine u kompletnoj domeni te u krupnom planu u okolici čestice za 2D slučaj. Na slikama 6.3 i 6.4 prikazana je magnituda brzine kod 3D slučaja.



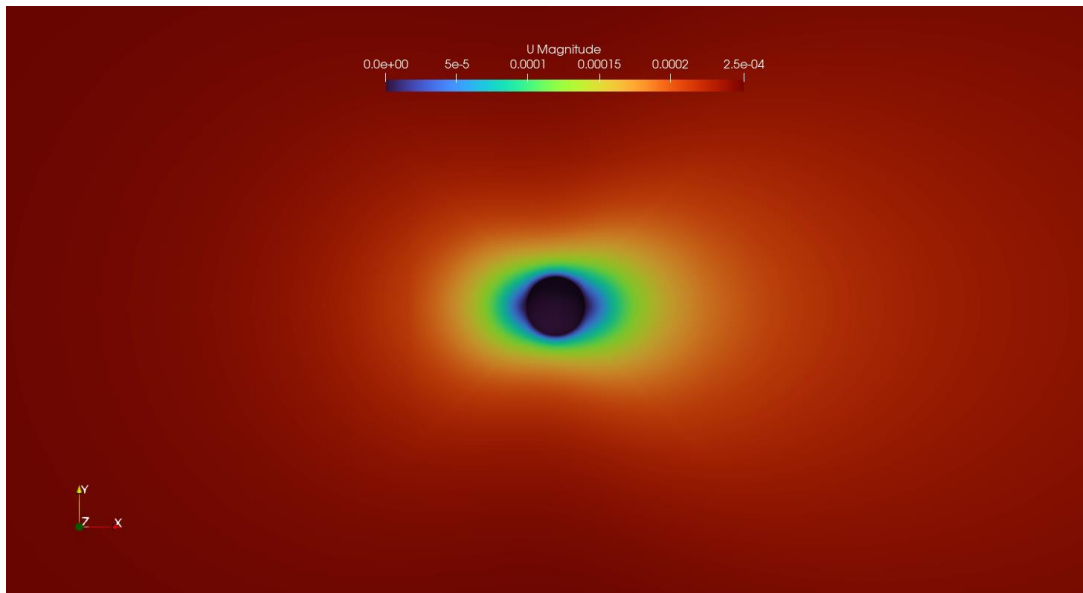
Slika 6.1 Magnituda brzine u domeni kod 2D slučaja



Slika 6.2 Krupan plan magnitude brzine u okolini sfere 2D slučaj

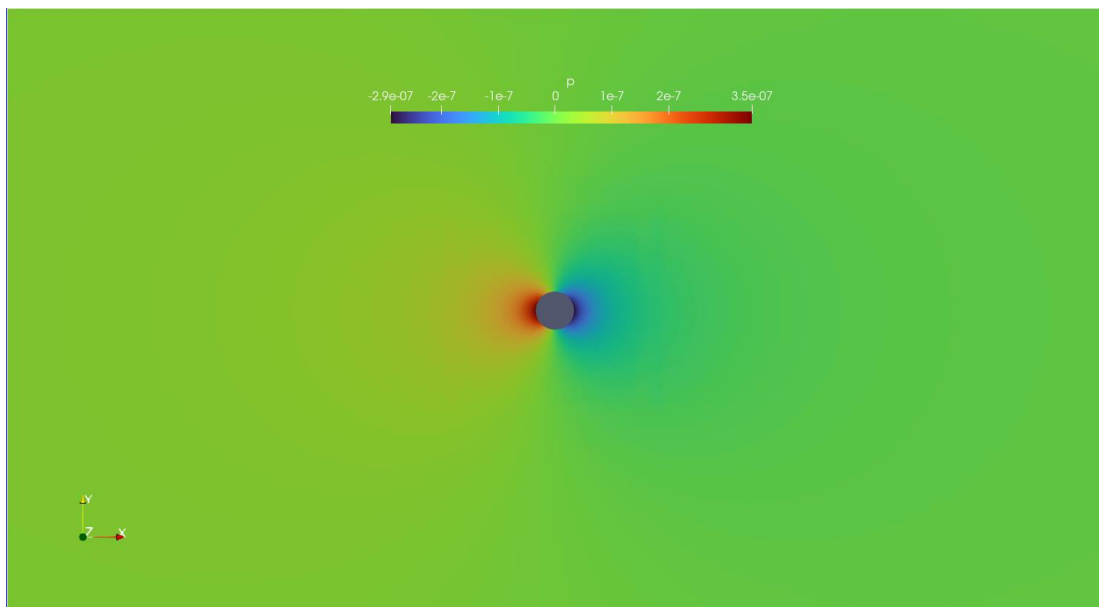


Slika 6.3 Raspodjela brzine u 3D domeni

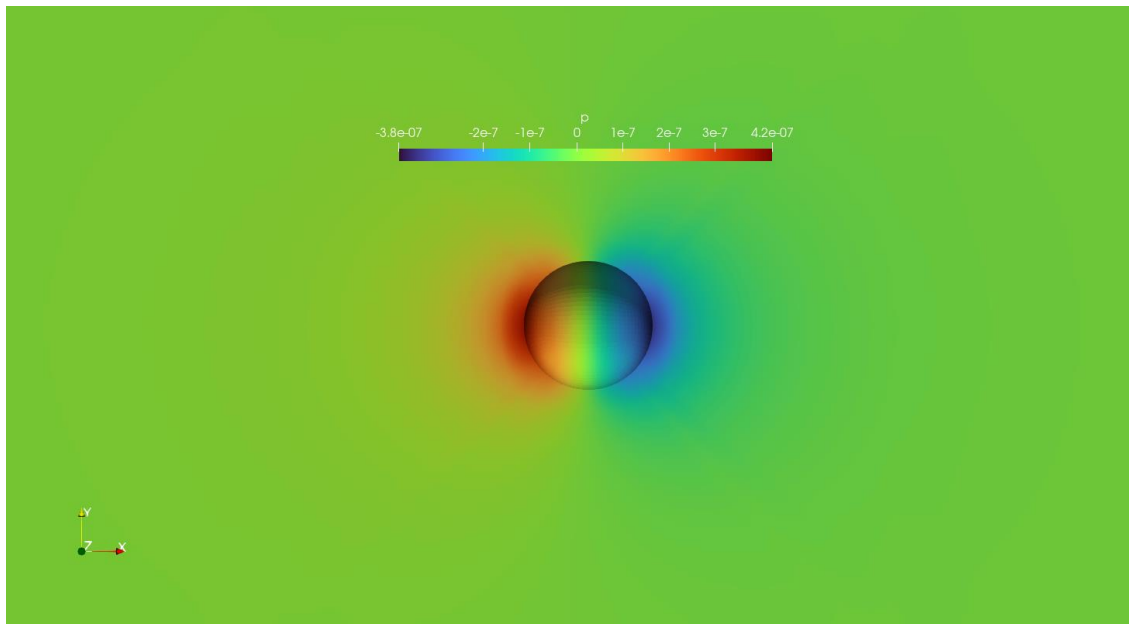


Slika 6.4 Krupan plan raspodjele brzina u 3D domeni

Moguće je uočiti kako je kod 3D slučaja magnituda brzine na većoj udaljenosti od same sfere bolje razvijena. Na slikama se uočavaju i karakteristične koncentrične kružnice na širem području domene. Zbog bolje gustoće mreže može se primijetiti kako je kod 2D slučaja brzina u bližoj okolini sfere bolje razvijena tj. gradijent magnituda brzine je vizualno glađi nego kod 3D slučaja. Zbog bolje mreže kod 2D slučaja također možemo uočiti kako tlak na slici 6.5 izgleda simetrično s obzirom na y-os što je i za očekivati kod rezultata ovakve simulacije dok na slici 6.6 vidimo blagu ne simetričnost.

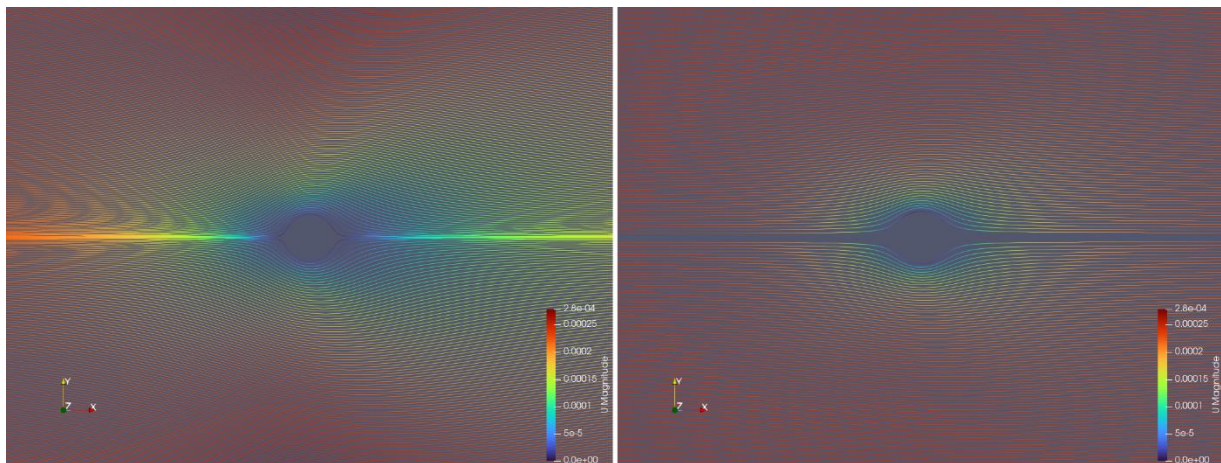


Slika 6.5 Raspodjela tlaka u 2D domeni



Slika 6.6 Raspodjela tlaka u 3D domeni

Na slici 6.7 prikazane su strujnice magnitude brzine 2D i 3D slučaja.

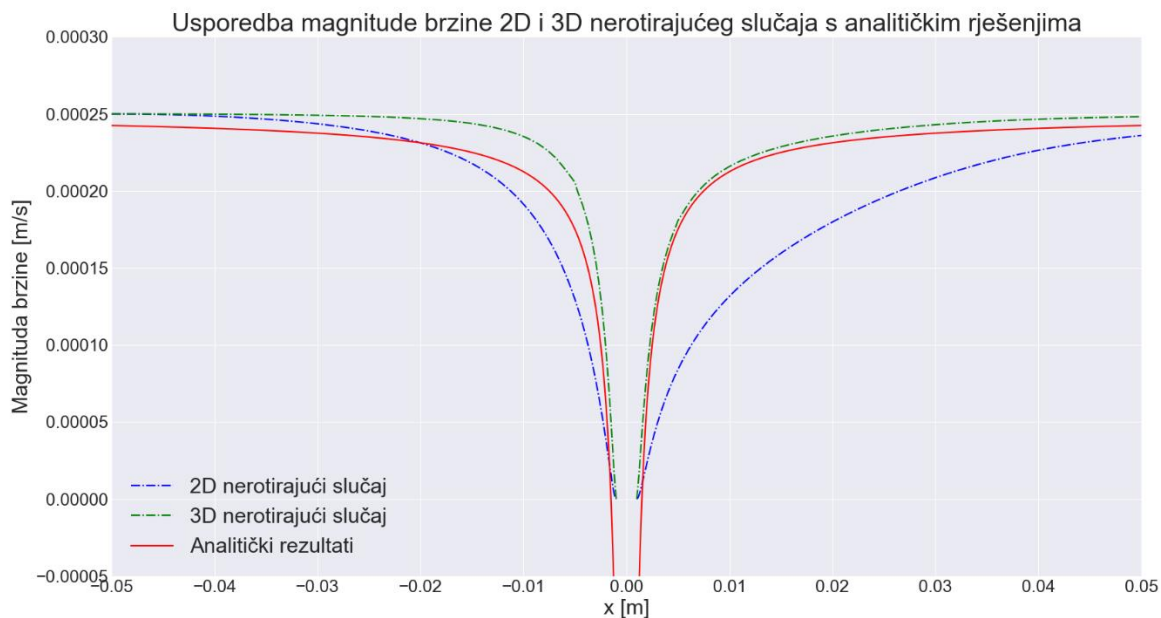


Slika 6.7 Strujnice magnitude brzine za 2D (lijevo) i 3D (desno) slučaj

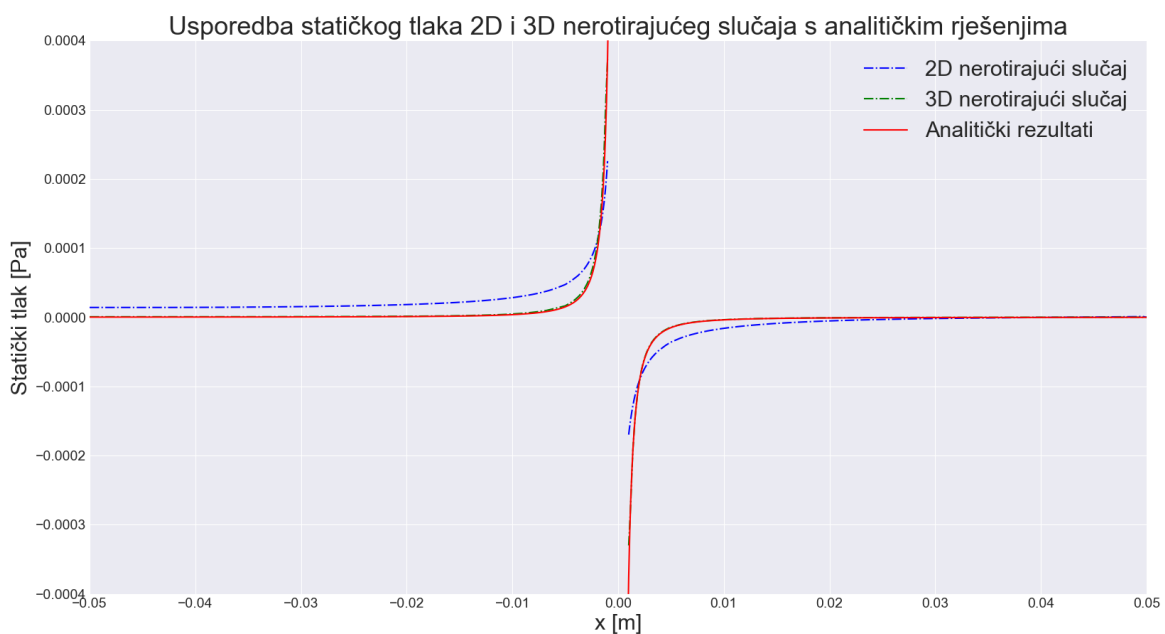
Kako bi se rezultati mogli usporediti s analitičkim rezultatima potrebno je iskoristiti određene opcije koje nudi softver. U radu su se redom koristile opcije *Slice/Clip*, *Extract Block*, *PlotOverLine* i *SpreadSheetView* za spremanje podataka o brzini i tlaku na središnjoj liniji. Podaci su potom spremljeni u .csv obliku kako bi se dalje mogli obraditi u Pythonu te usporediti s analitičkim rezultatima dobivenima uz pomoć formula 3.16 i 3.17.

Za dobivanje analitičkih rezultata u točno identičnim točkama domene u kojima se nalaze numerički rezultati bilo je potrebno unijeti x koordinate točaka dobivenih numeričkom simulacijom u analitičke formule.

Kako bi se vizualno rezultati mogli usporediti napravljena su dva grafa. Prvi graf na slici 6.8 prikazuje ovisnost magnitude brzine o koordinati x na centralnoj liniji. Možemo uočiti kako za 3D slučaj magnituda brzine (zelena boja) prije puno bliže analitičkom rješenju u usporedbi s 2D slučajem. Drugi graf na slici 6.9 prikazuje ovisnost tlaka o koordinati x na centralnoj liniji. Vizualno se može zaključiti kako je 3D slučaj puno bliži analitičkoj vrijednosti statičkog tlaka od 2D slučaja.



Slika 6.8 Graf ovisnosti magnitude brzine s obzirom na poziciju po x osi na središnjoj liniji



Slika 6.9 Graf ovisnosti tlaka s obzirom na poziciju po x osi na središnjoj liniji

Za mjerenje prosječne razlike između dvaju skupova podataka koristi se *RMSE* ili srednje kvadratno odstupanje. *RMSE* se matematički izražava na sljedeći način:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}. \quad (6.1)$$

Gdje su: x_i – elementi prvog skupa podataka,
 y_i – elementi drugog skupa podataka,
 N – ukupan broj elemenata u skupovima.

Za prikaz *RMSE*-a napravljena je Tablica 6.1 odstupanja 2D i 3D slučaja za područje prije i nakon sfere. Iz srednjeg kvadratnog odstupanja zaključuje se kako je 3D slučaj manje kvalitete mreže mnogo povoljniji za opisivanje ovakve vrste simulacije. Dodatnim poboljšanjem 3D mreže može se pretpostaviti kako bi kvaliteta rezultata dodatno porasla, iako je već i sa ovakvom mrežom 3D slučaj nekoliko redova veličine točniji od 2D slučaja.

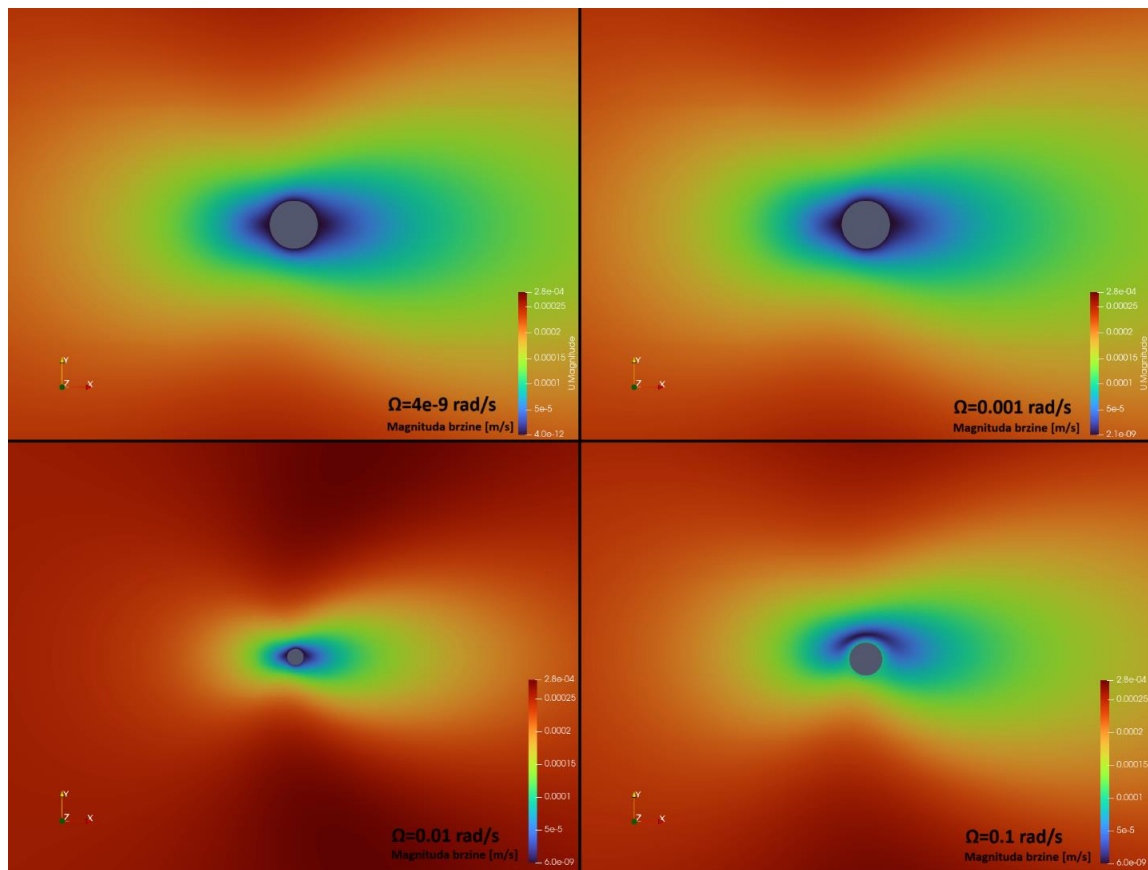
Tablica 6.1 Srednje kvadratnog odstupanja za 3D i 2D slučaj u usporedbi s analitičkim rezultatima

	2D ispred	2D nakon	3D ispred	3D nakon
PRMSE [%]	0,00212820	0,17643524	0,00000338	0,00011818
VRMSE [%]	0,00188188	0,02284627	0,00001922	0,00021969

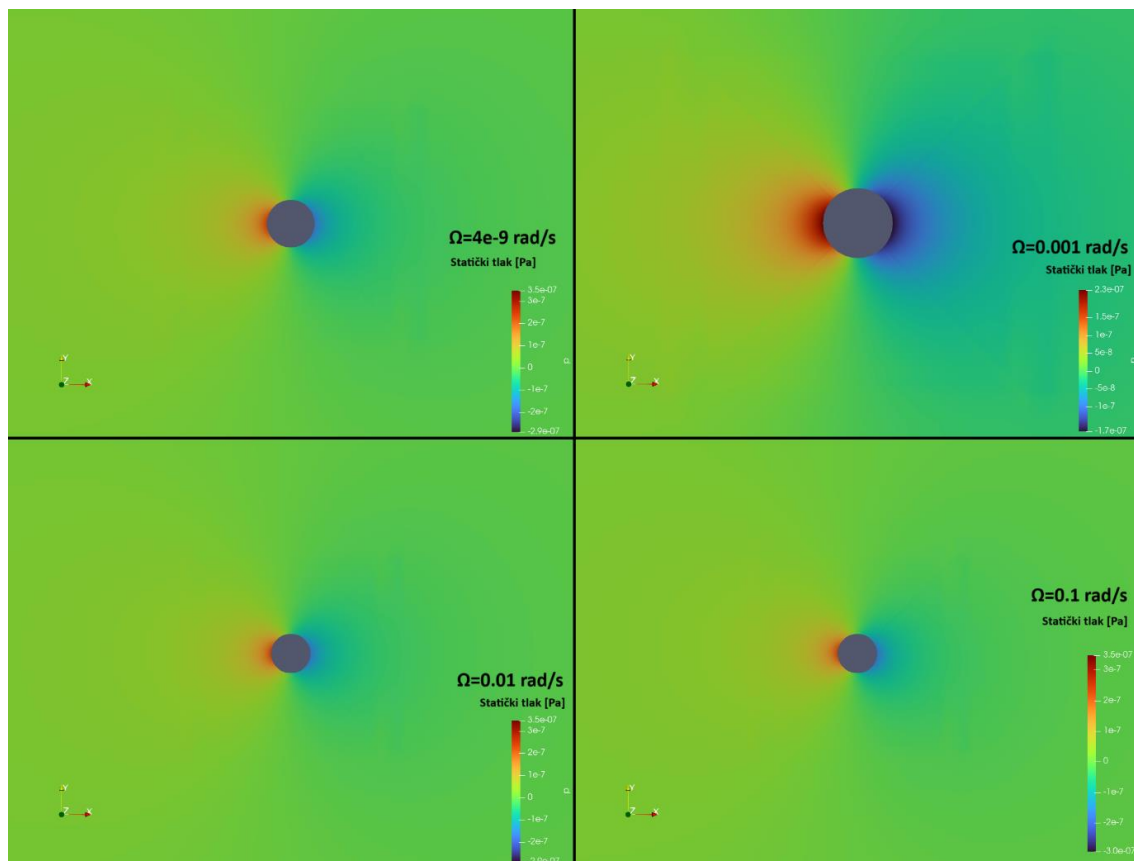
6.2 Rezultati rotirajuće čestice u OpenFOAM-u

Rezultati dobiveni simulacijom obrađeni su u softveru *ParaView*. Kako je prethodno spomenuto simulacije su izrađene za brzine rotacije od $\Omega = 4 \cdot 10^{-9}$, 0,001, 0,01, 0,1, 1 rad/s za 3D slučaj, dok za 2D slučaj nije izrađena simulacija za kutnu brzinu rotacije od $\Omega = 1$ rad/s.

Slike 6.10 i 6.11 prikazuju magnitudu brzine i statički tlak pri različitim kutnim brzinama rotacije čestice za 2D slučaj.

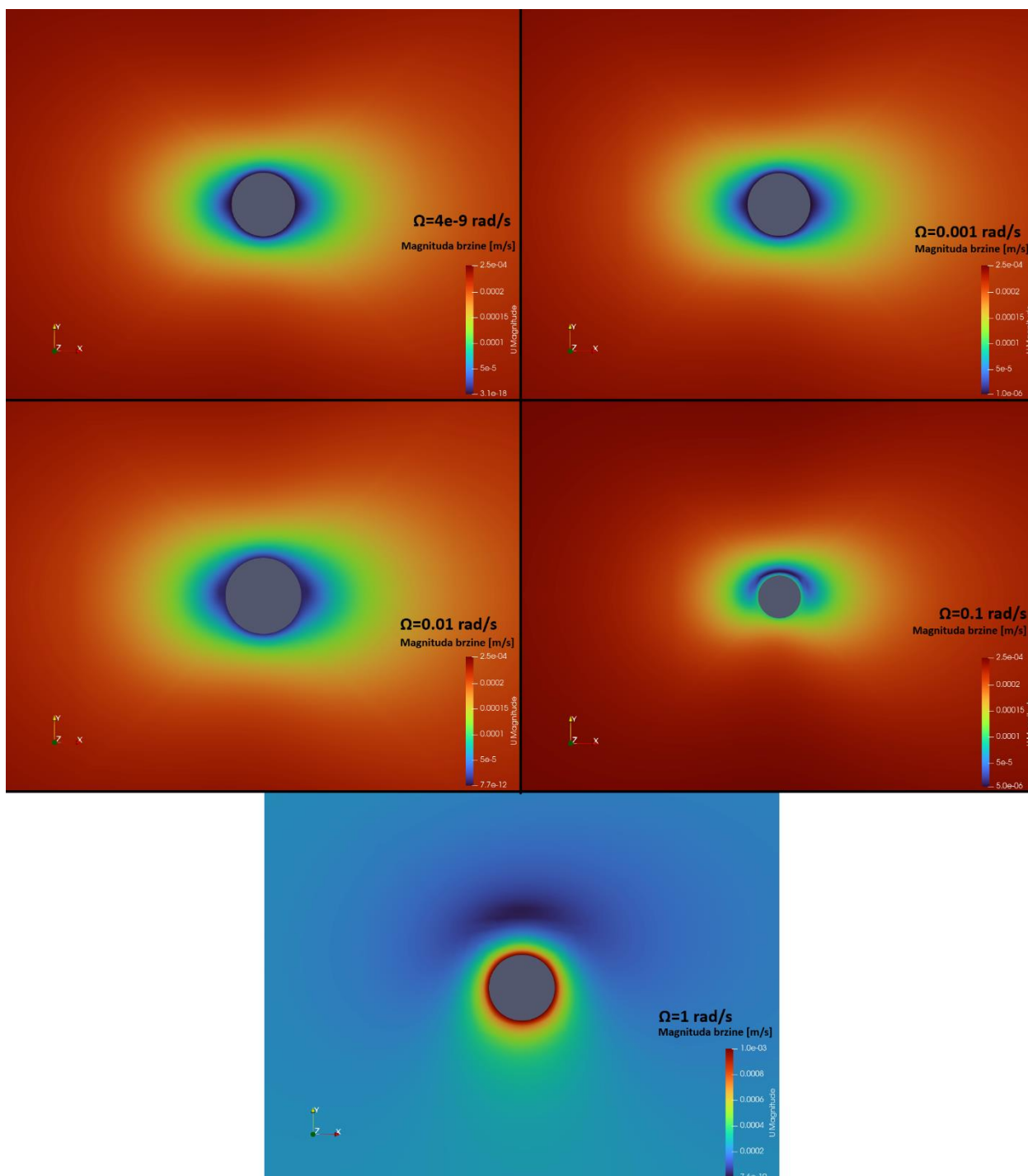


Slika 6.10 Magnituda brzine u 2D slučaju pri različitim kutnim brzinama rotacije

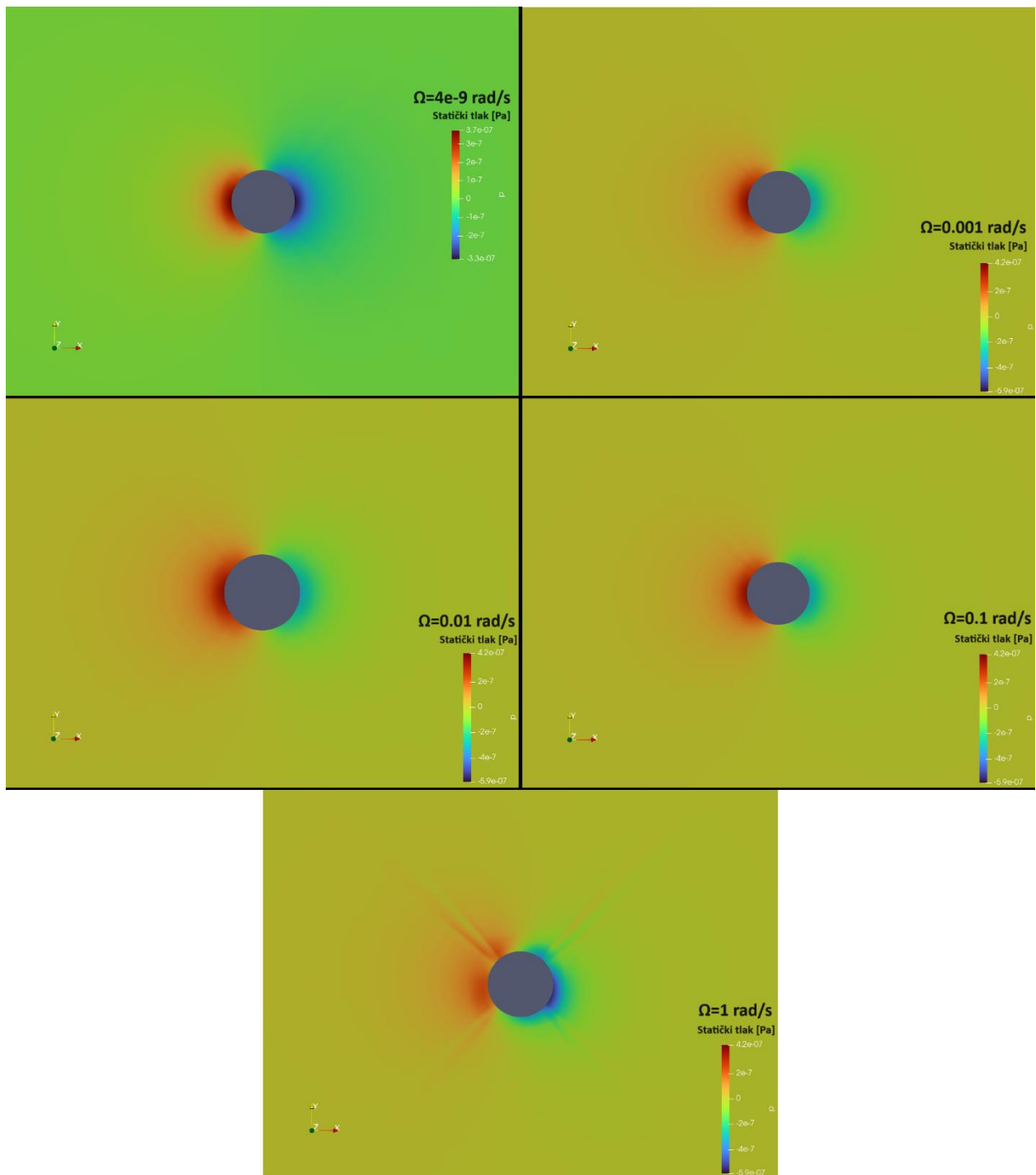


Slika 6.11 Tlak u okolici čestice kod 2D slučaju pri različitim kutnim brzinama rotacije

Slike 6.12 i 6.13 prikazuju magnitudu brzine i statički tlak pri različitim kutnim brzinama rotacije čestice za 3D slučaj.



Slika 6.12 Magnituda brzine u 3D slučaju pri različitim kutnim brzinama rotacije



Slika 6.13 Tlak u 3D slučaju pri različitim kutnim brzinama rotacije

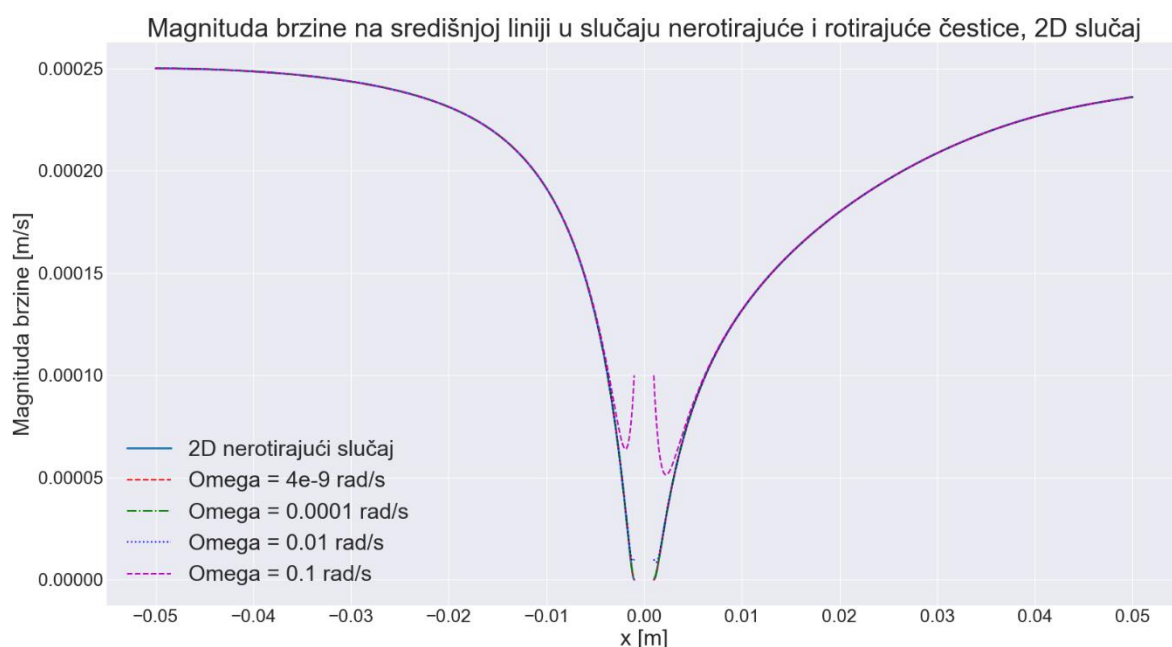
Može se uočiti kako je povećanjem brzine rotacije čestice zbog *noSlip* uvjeta brzina u bližoj okolici čestice veća. Vizualno se kod manjih kutnih brzina ne vidi veća razlika u magnitudi brzine niti u tlaku u odnosu na nerotirajući slučaj. Povećanjem kutne brzine dolazi do većeg odstupanja u usporedbi s rezultatima nerotirajuće čestice pa tako i u usporedbi s analitičkim rezultatima. Kod prikaza tlaka pri najvećoj kutnoj brzini jasno se vidi kako dolazi do naglih prijelaza tlaka.

6.3 Usporedba rezultata nerotirajuće i rotirajuće čestice

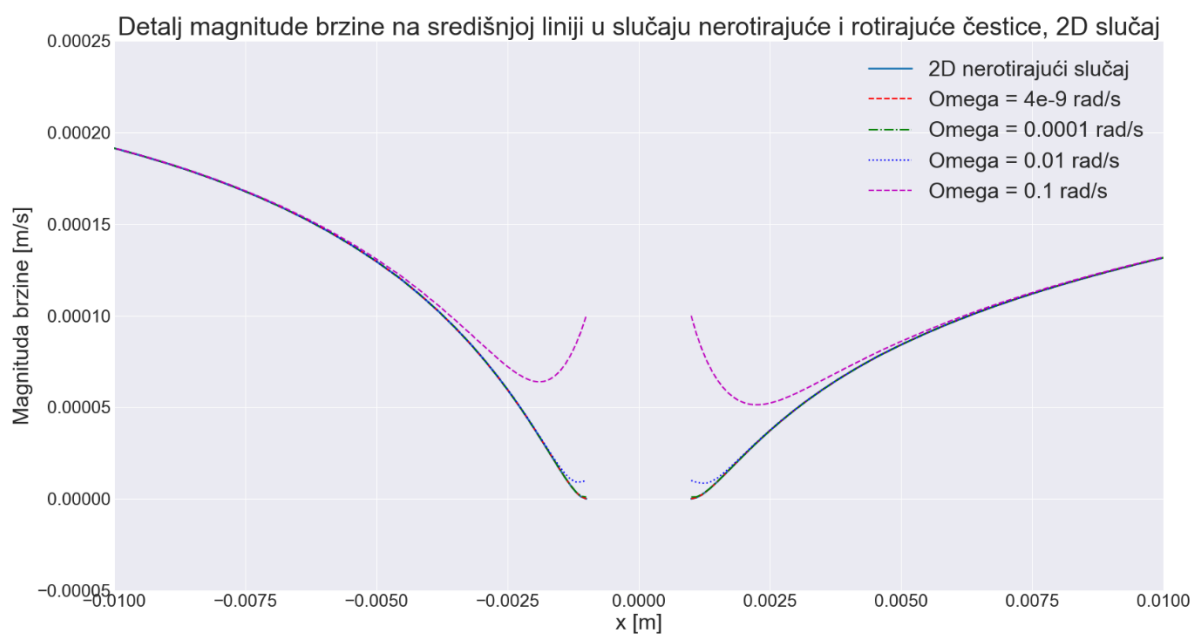
U ovom će se odlomku usporediti rezultati nerotirajuće čestice s rezultatima rotirajuće čestice. Usporedit će se odvojeno 2D i 3D slučaj te će se izračunati srednje kvadratno odstupanje rotirajućih slučajeva u odnosu na nerotirajući slučaj kroz provedene numeričke simulacije. Numeričke simulacije uspoređivane u ovom poglavlju izrađene su u *OpenFOAM*-u.

6.3.1 Usporedba rezultata za 2D slučaj

Slike 6.14 i 6.15 prikazuju odstupanje magnitude brzine povećanjem kutne brzine rotacije čestice. Kao i u prethodnim grafovima za 2D slučaj očekuju se nešto niži rezultati u području nakon čestice u usporedbi s područjem prije čestice.

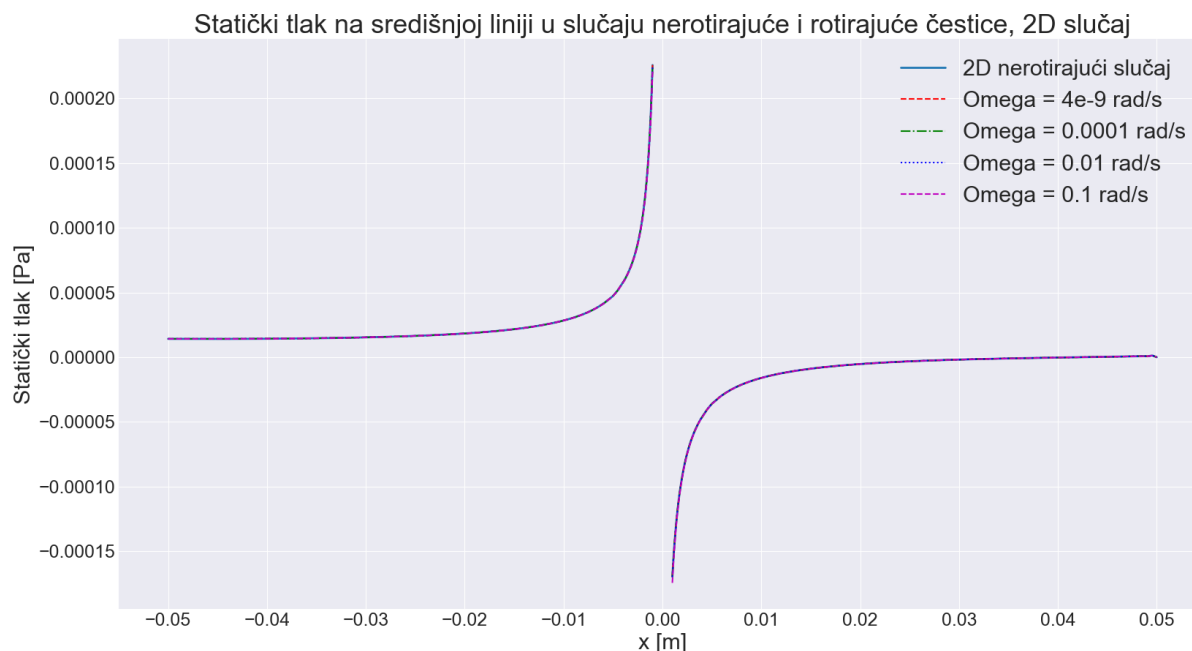


Slika 6.14 Magnituda brzine na središnjoj liniji

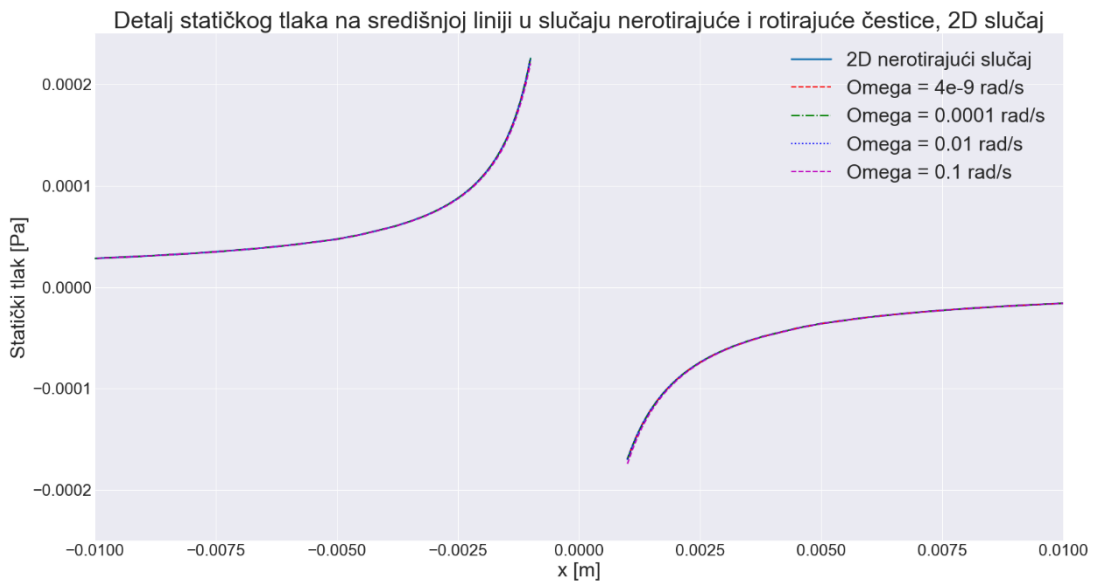


Slika 6.15 Detalj magnitude brzine na središnjoj liniji

Iz slika 6.14 i 6.15 može se vidjeti kako rotacije čestice utječe na područje u neposrednoj blizini same čestice. Povećanjem brzine rotacije odstupanje od 2D nerotirajućeg slučaja sve je veće. Može se uočiti nesimetričnost lijeve i desne strane. Slike 6.16 i 6.17 prikazuju statički tlak na središnjoj liniji.



Slika 6.16 Statički tlak na središnjoj liniji



Slika 6.17 Detalj statičkog tlaka na središnjoj liniji

Povećanjem kutne brzine ne vidi se veće odstupanje u tlaku na središnjoj liniji. Kako bi se odstupanje kvantificiralo izračunato je srednje kvadratno odstupanje. Tablica 6.2 prikazuje odstupanje magnitude brzine i statičkog tlaka između 2D nerotirajućeg slučaja numeričke simulacije i svakog 2D rotirajućeg slučaja numeričke simulacije.

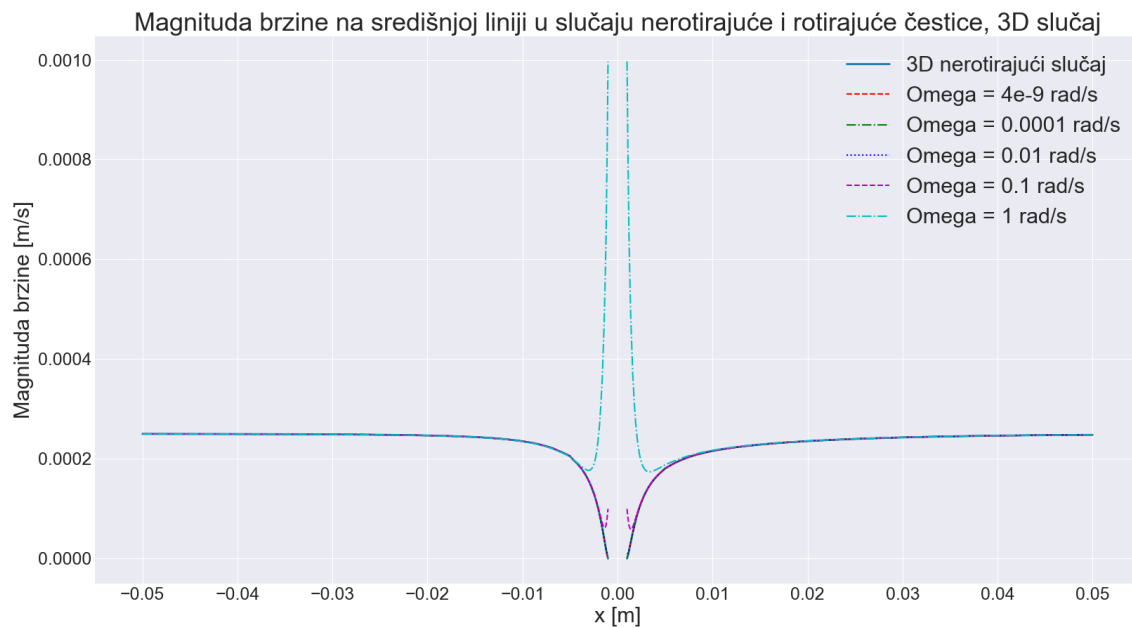
Tablica 6.2 Srednje kvadratno odstupanje od 2D nerotirajućeg slučaja

	vRMSE [%]	pRMSE [%]
$\Omega = 4e-9$ rad/s	1,57E-08	5,80E-09
$\Omega = 0,001$ rad/s	4,91E-06	9,43E-09
$\Omega = 0,01$ rad/s	6,86E-05	4,17E-07
$\Omega = 0,1$ rad/s	0,000968101	4,17E-05

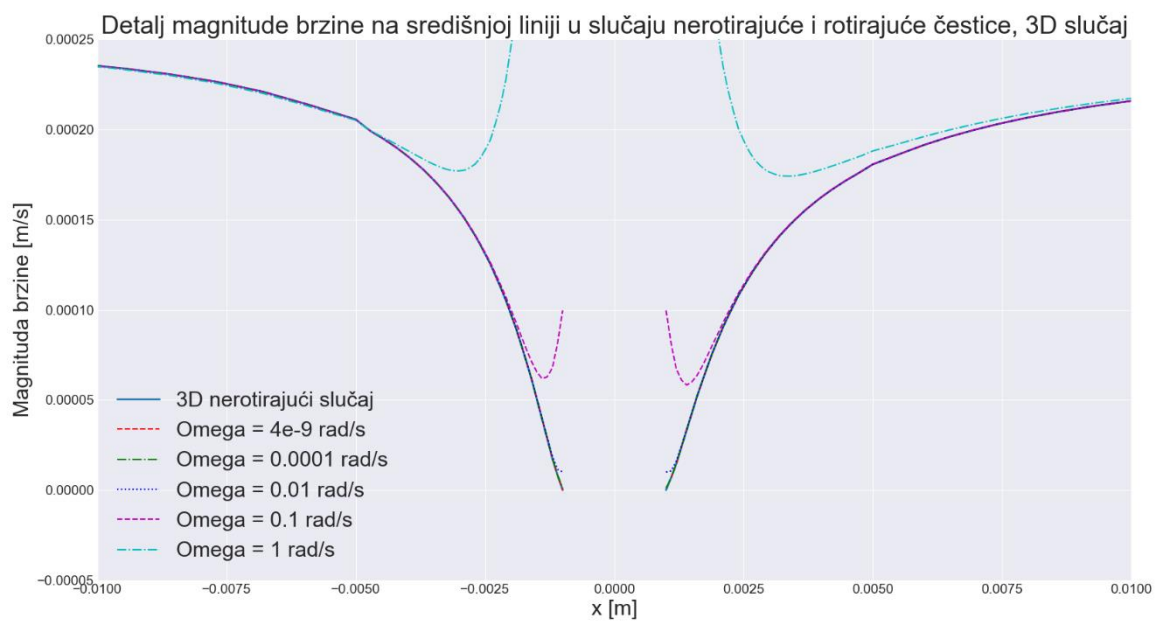
Kao što je prethodno zaključeno iz vizualnog prikaza podataka može se uočiti kako se srednje kvadratno odstupanje raste povećanjem kutne brzine rotacije čestice.

6.3.2 Usporedba rezultata za 3D slučaj

Slike 6.18 i 6.19 prikazuju odstupanje magnitude brzine povećanjem kutne brzine rotacije čestice. Za razliku od 2D slučaja, očekuje se veća simetričnost područja prije čestice i područja nakon čestice mikroplastike.

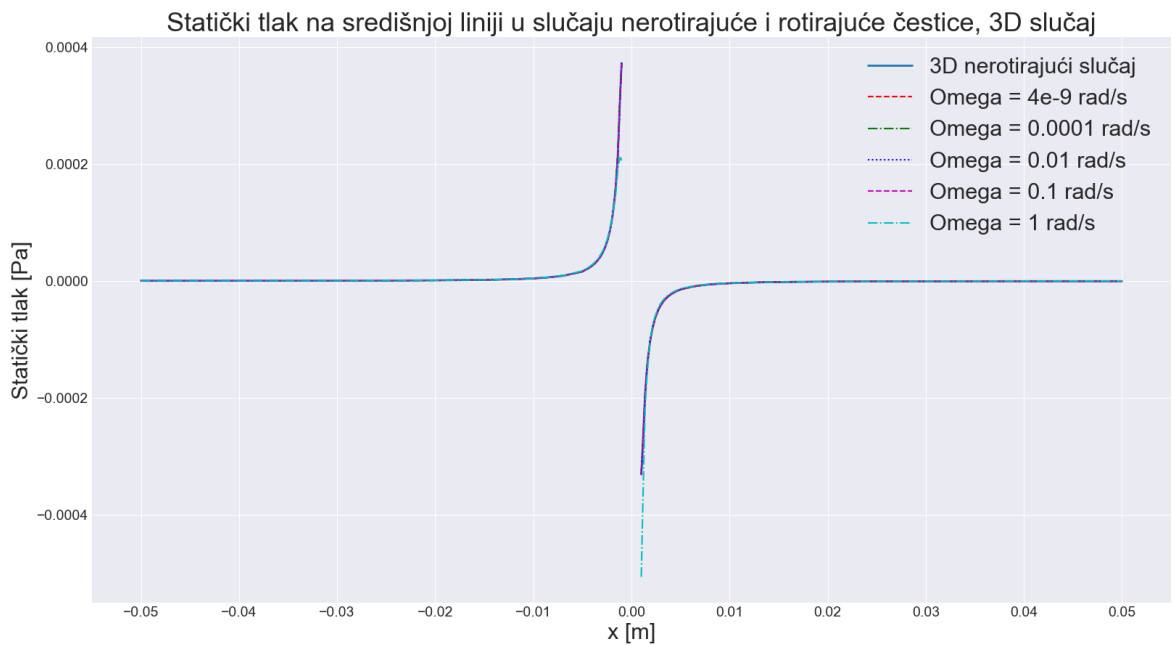


Slika 6.18 Magnituda brzine na središnjoj liniji

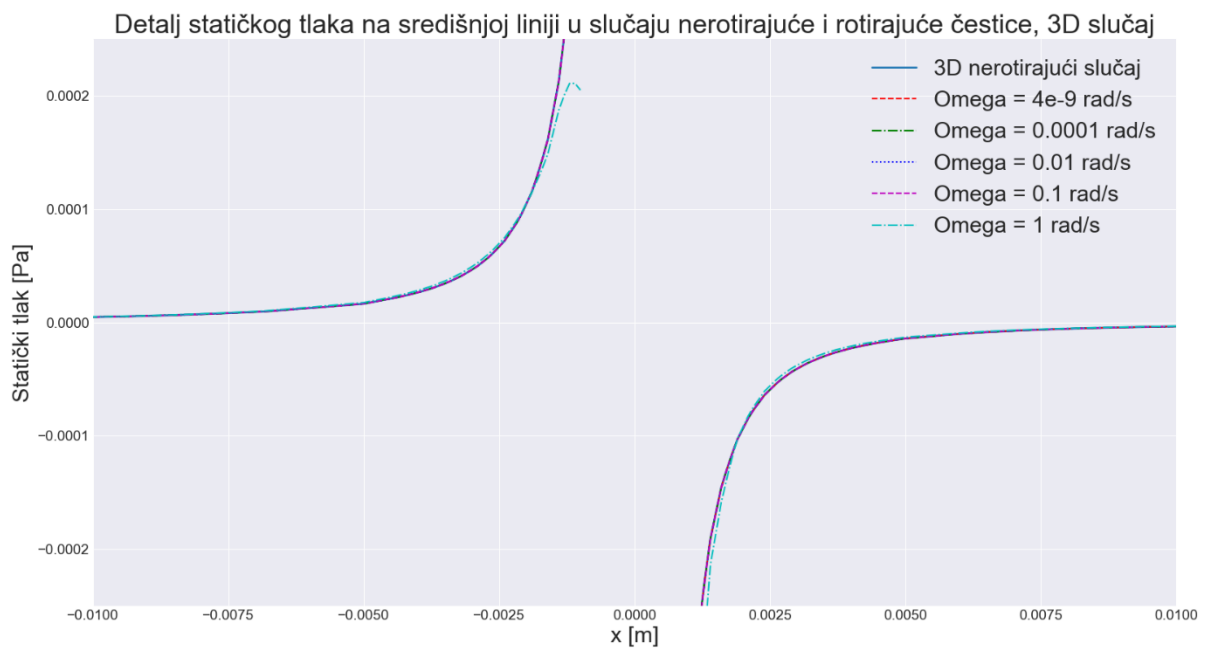


Slika 6.19 Detalj magnitude brzine na središnjoj liniji

Iz slika 6.18 i 6.19 može se vidjeti kako rotacije čestice utječe na područje u neposrednoj blizini same čestice. Povećanjem brzine rotacije odstupanje od 3D nerotirajućeg slučaja sve je veće. Može se uočiti blaga nesimetričnost područja prije i nakon čestice. Slike 6.20 i 6.21 prikazuju statički tlak na središnjoj liniji.



Slika 6.20 Statički tlak na središnjoj liniji



Slika 6.21 Detalj statičkog tlaka na središnjoj liniji

Povećanjem kutne brzine rotacije odstupanje tlaka na središnjoj liniji raste. Kako bi se odstupanje kvantificiralo izračunato je srednje kvadratno odstupanje. Tablica 6.3 prikazuje odstupanje magnitude brzine i statičkog tlaka između 3D nerotirajućeg slučaja numeričke simulacije i svakog 3D rotirajućeg slučaja numeričke simulacije.

Tablica 6.3 Srednje kvadratno odstupanje od 3D nerotirajućeg slučaja

	vRMSE [%]	pRMSE [%]
$\Omega = 4e-9$ rad/s	3,31E-09	4,58E-09
$\Omega = 0,001$ rad/s	4,50E-06	5,63E-09
$\Omega = 0,01$ rad/s	4,82E-05	4,22E-06
$\Omega = 0,1$ rad/s	0,000643	1,07E-05
$\Omega = 1$ rad/s	0,007827	0,001081

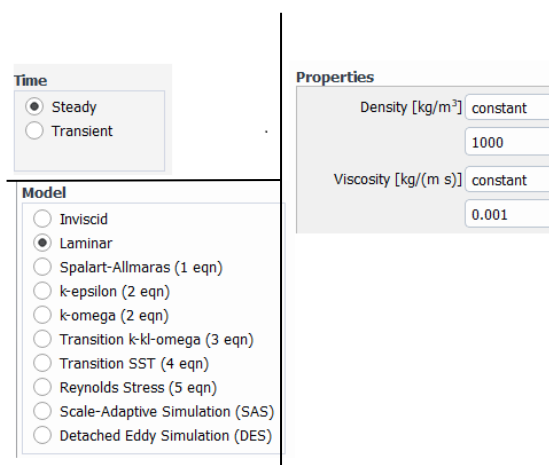
Kao što je prethodno zaključeno iz vizualnog prikaza podataka može se uočiti kako se srednje kvadratno odstupanje povećava povećanjem kutne brzine rotacije čestice kod 2D i 3D slučaja numeričke simulacije. Odstupanja pri manjim brzinama rotacije gotovo su zanemariva, dok pri većim brzinama rotacije dolazi do značajnijeg odstupanja, posebice u području u neposrednoj blizini čestice.

7 POSTAVLJANJE SLUČAJA U ANSYS FLUENTU

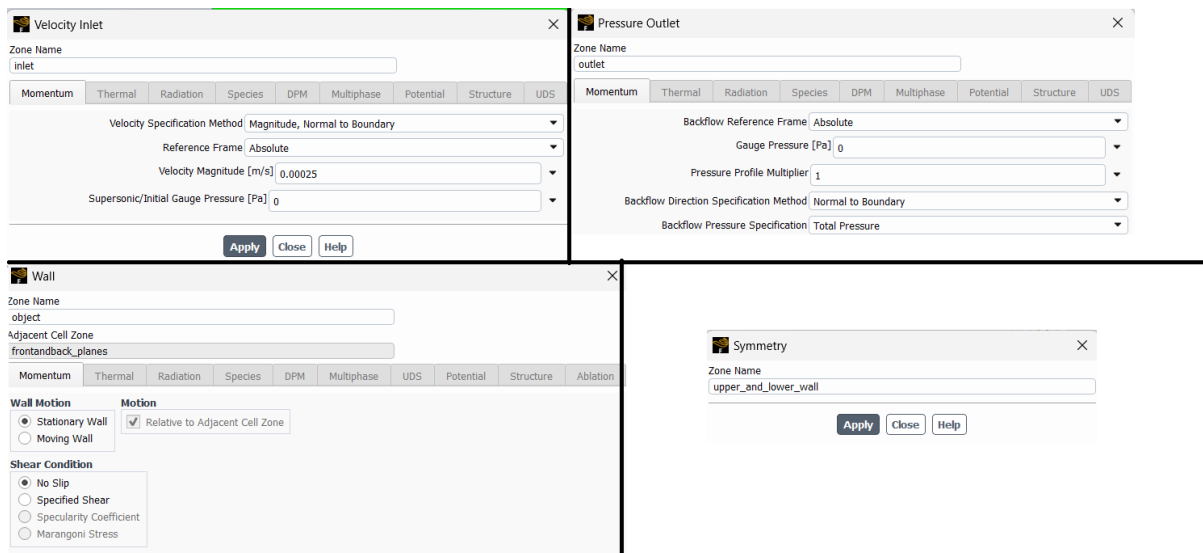
Ansys Fluent napredni je softver za simulacije računarske dinamike fluida. Koristi se za modeliranje strujanja tekućina, kemijskih reakcija, prijenosa topline, elektromagnetskih svojstava itd. Za razliku od *OpenFOAM-a*, *Ansys Fluent* ima korisničko sučelje u kojemu se postavlja sama simulacija. Softver je često korišten u različitim industrijama poput automobilske, zrakoplovne, energetske, kemijske i građevinske industrije. Prethodno izrađenu mrežu uz pomoć *Ansys Mesh* modula potrebno je povezati s *Fluent* modulom te potom kreće postavljanje simulacije. Pomoću funkcije *XY Plot* izvučeni su rezultati u .csv obliku koji će potom biti iskorišteni u daljnjoj usporedbi.

7.1 Ansys Fluent slučaj nerotirajuće čestice

U usporedbi s *OpenFOAM* slučajem u ovom je slučaju postavljena stacionarna simulacija. Simulacija je postavljena na laminarno strujanje s obzirom da je brzina fluida na ulazu 0,00025 m/s. Fluid korišten u simulaciji je voda. Na izlazu fluida iz domene nalazi se atmosferski tlak dok se na ostalim plohama nalazi rubni uvjet symmetry. Metode izračuna simulacije na početku su postavljene na first order te zatim premještene na second order. Takvim se postupkom na samom početku ubrzava simulacija te se dobivaju rezultati manje točnosti. Premještanjem metode na second order dobivaju se točniji rezultati uz veće vrijeme potrebno za izračun simulacije. Kako bi se dobila točnija rješenja koja su kasnije potrebna kod usporedbe s analitičkim rješenjima reziduali su dodatno postroženi. Inicijalizacija je u svim slučajevima pokrenuta s inleta. Slike 7.1 i 7.2 prikazuju postavljanje simulacije u *Ansys Fluent-u*.



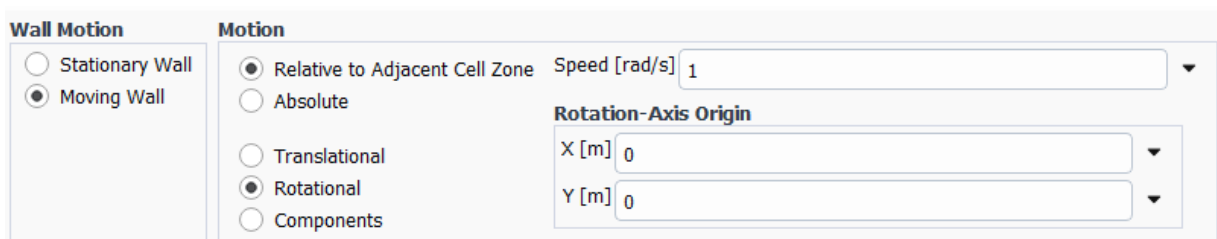
Slika 7.1 Postavljanje stacionarne simulacije, modela i svojstva fluida



Slika 7.2 Postavljanje rubnih uvjeta

7.2 Ansys Fluent slučaj rotirajuće čestice

U usporedbi sa slučajem nerotirajuće čestice, potrebno je namjestiti postavku *Moving Wall*. Zadana je rotacija čestice kao i kod *OpenFOAM* slučaju. Brzine rotacije su redom: 1, 0,1, 0,01, 0,001 te $4 \cdot 10^{-9}$ rad/s. Slika 7.3 prikazuje postavljanje rotacije čestice.



Slika 7.3 Postavke rotacije čestice

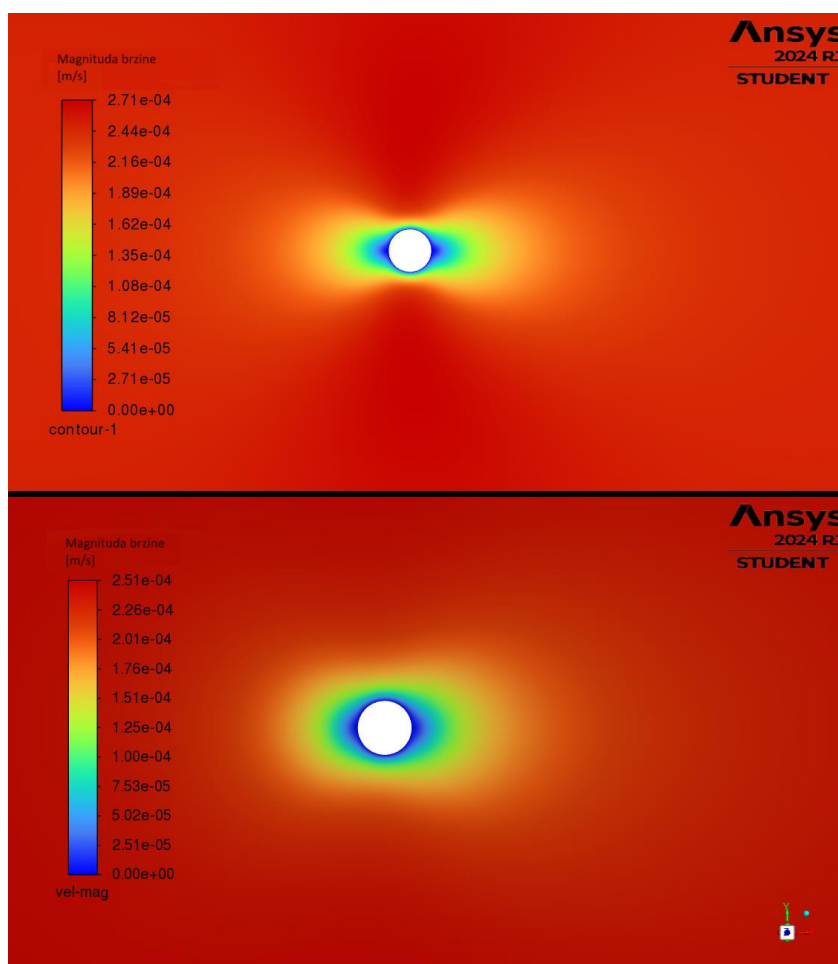
8 USPOREDBA REZULTATA

U ovom će poglavlju biti uspoređeni rezultati dobiveni uz pomoć *OpenFOAM*-a te rezultati dobiveni u *Ansys Fluent*-u. S obzirom da je kod *OpenFOAM* slučaja postavljeno nestacionarno strujanje fluida pretpostavlja se kako bi ti vremenski uvjetovani rezultati trebali biti točniji.

8.1 Rezultati dobiveni u Ansys Fluent-u

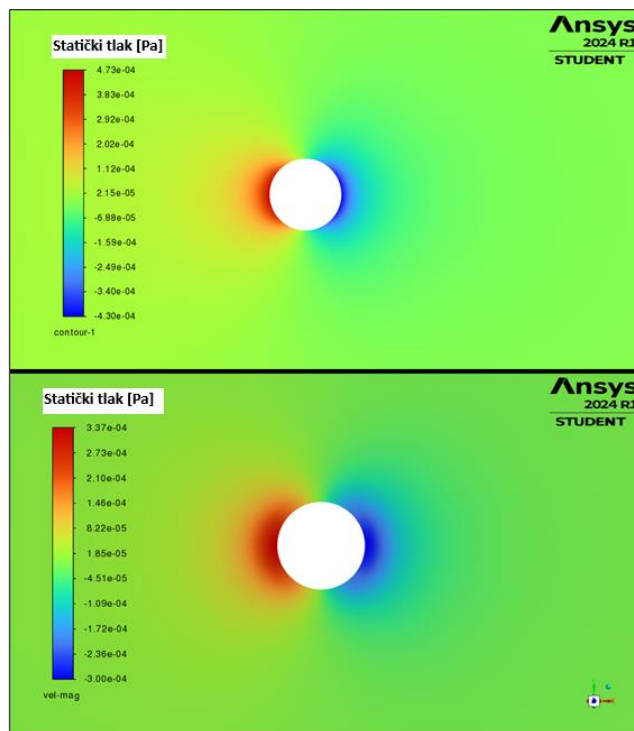
8.1.1 Vizualizacija rezultata nerotirajuće čestice

Na slici 8.1 prikazana je magnituda brzine u okolini čestice u 2D i 3D stacionarnom slučaju.



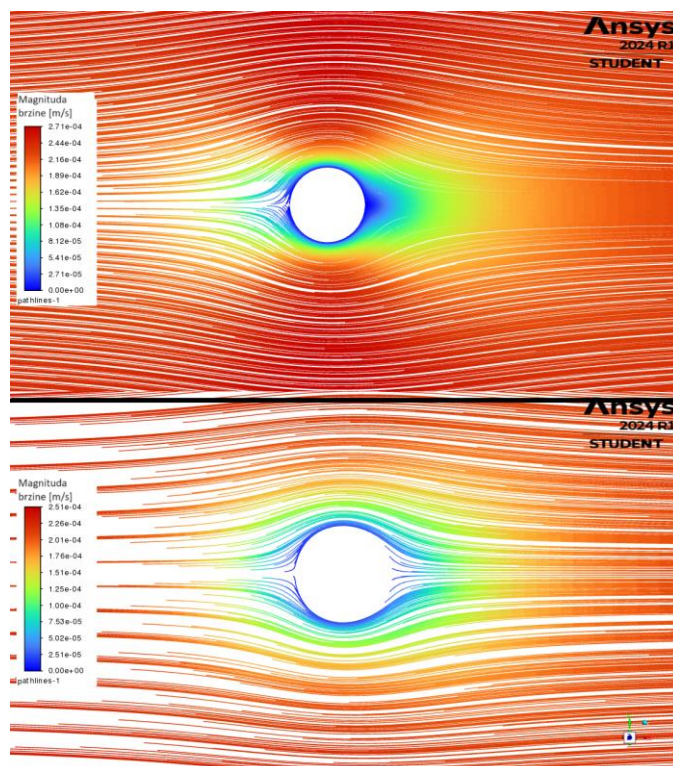
Slika 8.1 Magnituda brzine 2D (gore) i 3D (dolje) slučaja

Iz slike 8.1 može se uočiti kako je magnituda brzine za 2D poprilično simetrična te bi s time i rezultati trebali biti zadovoljavajući. Za 3D slučaj može se uočiti nesimetričnost lijevog i desnog dijela magnitude brzine. Poboljšanjem 3D numeričke mreže dobila bi se pravilnija raspodjela magnitude brzine. Slika 8.2. prikazuje usporedbu tlakova za 2D i 3D slučaj.



Slika 8.2 Usporedba tlaka za 2D (gore) i 3D slučaj (dolje)

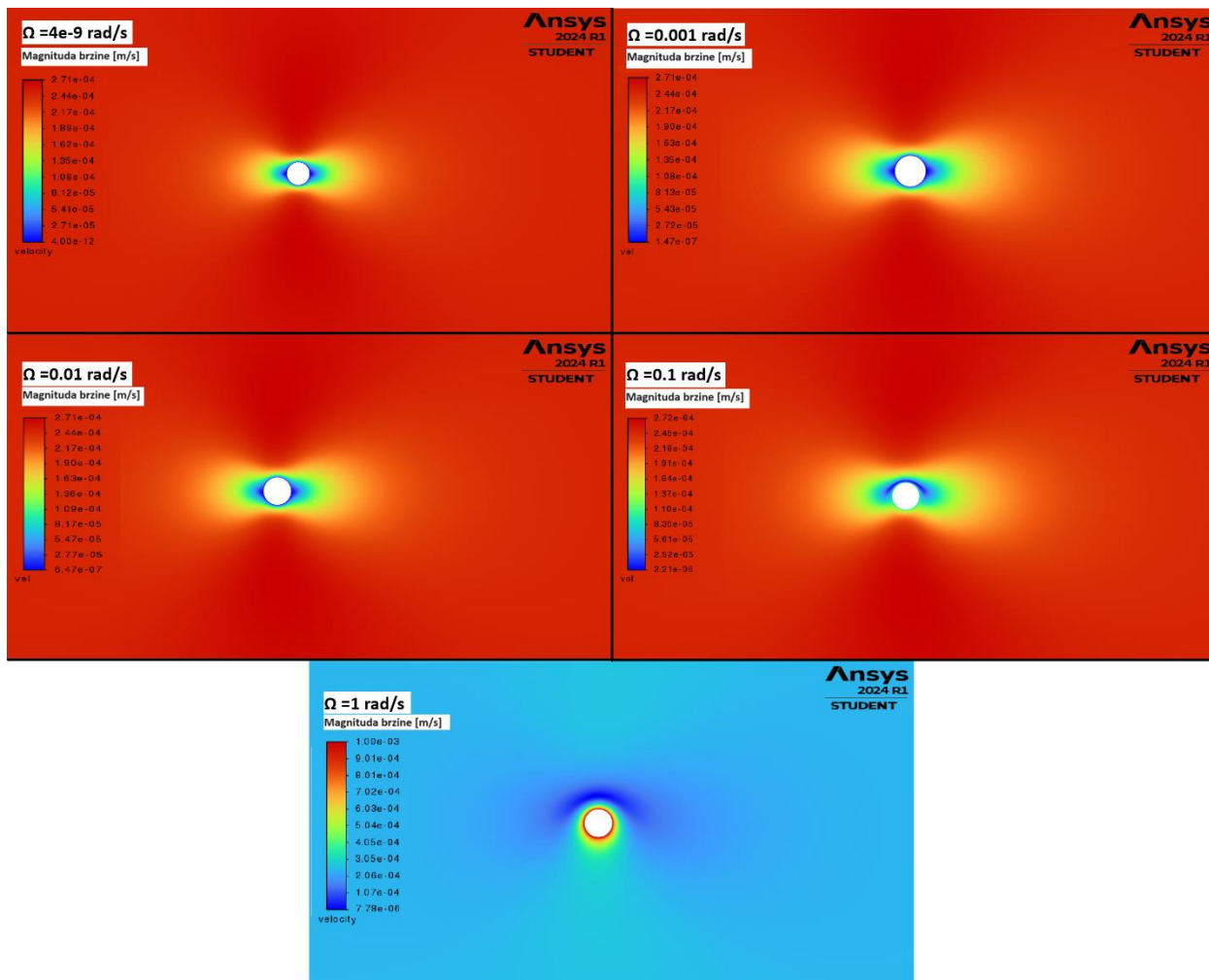
Iz slike 8.2 može se uočiti kako u području nakon čestice dolazi do manje apsolutne vrijednosti statičkog tlaka u odnosu na područje prije čestice gdje dolazi do nešto većih apsolutnih vrijednosti statičkog tlaka. Na slici 8.3 prikazane su strujnice magnitude brzine oko čestice mikroplastike u 2D i 3D slučaju.



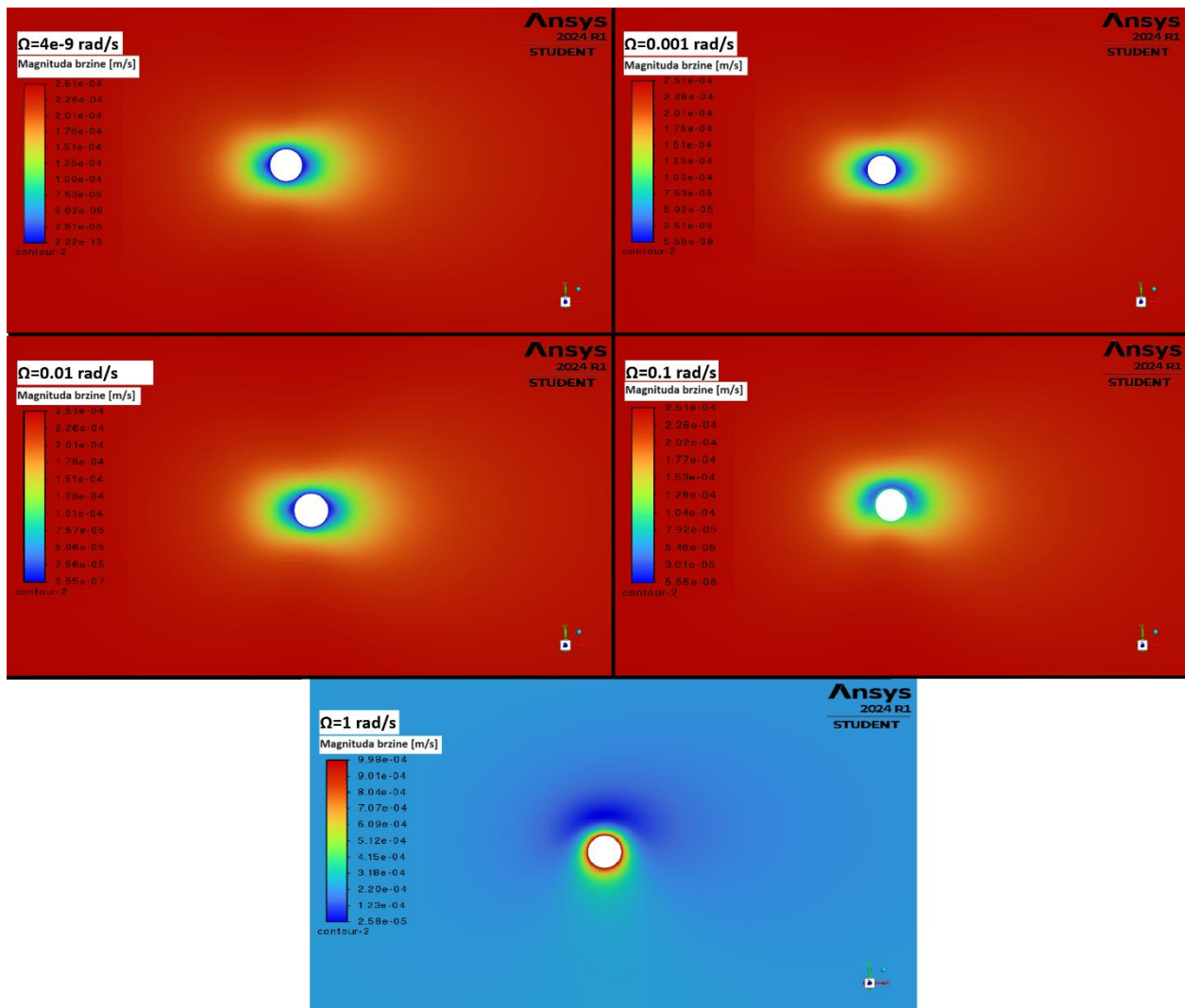
Slika 8.3 Strujnice magnitude brzine u 2D i 3D slučaju

8.1.2 Vizualizacija rezultata rotirajuće čestice

Slike 8.4 i 8.5 prikazuju magnitudu brzine za 2D i 3D slučaj pri različitim kutnim brzinama rotacije čestice. Kao i u nestacionarnim simulacijama izrađenim u *OpenFOAM*-u, očekuje se različita raspodjela magnitudu brzine u neposrednoj okolici čestice.

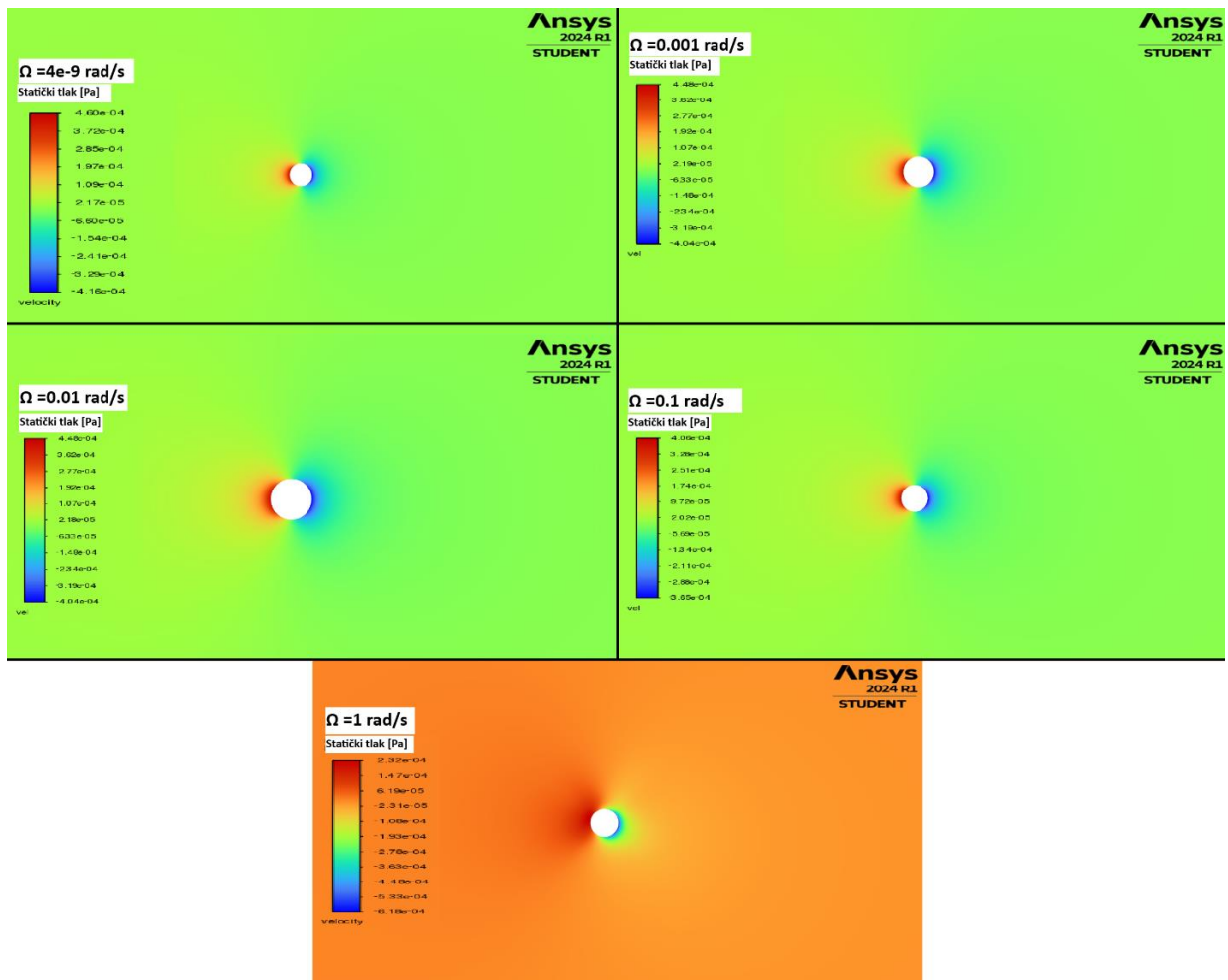


Slika 8.4 Magnituda brzine pri različitim kutnim brzinama rotacije čestice u 2D slučaju

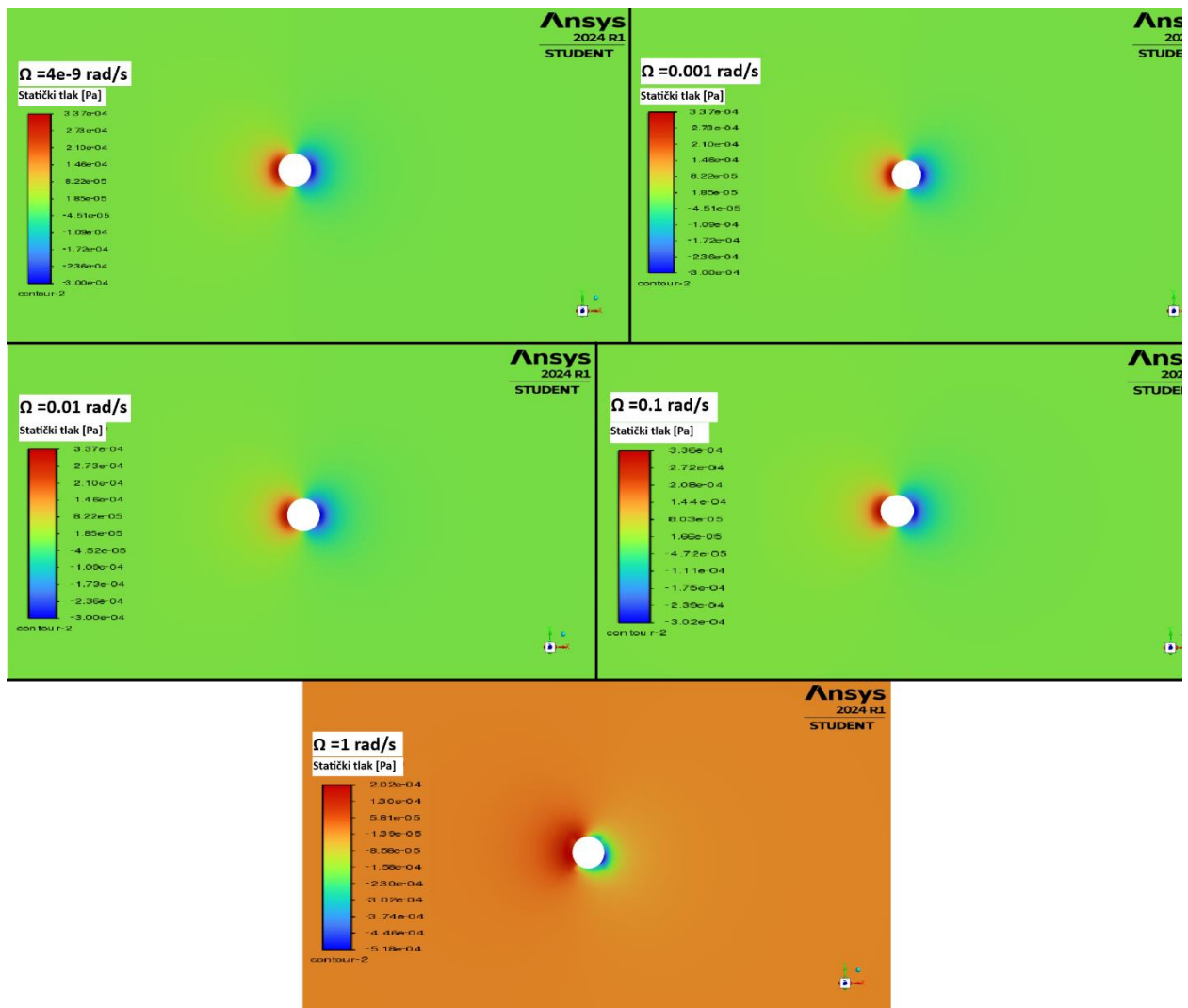


Slika 8.5 Magnituda brzine pri različitim kutnim brzinama rotacije čestice u 3D slučaju

Iz slika 8.4 i 8.5 može se uočiti kako je pri većim kutnim brzinama rotacije drugačija raspodjela magnitude brzine u okolici čestice. Povećanjem kutne brzine rotacije dolazi do veće magnitude brzine u samoj okolici čestice. Već iz vizualnog dijela dalo bi se zaključiti kako se povećanjem brzine rotacije rezultati udaljavaju od rezultata nerotirajuće čestice. Slike 8.6 i 8.7 prikazuju tlak za 2D i 3D slučaj pri različitim kutnim brzinama rotacije čestice



Slika 8.6 Statički tlak u 2D slučaju pri različitim kutnim brzinama rotacije

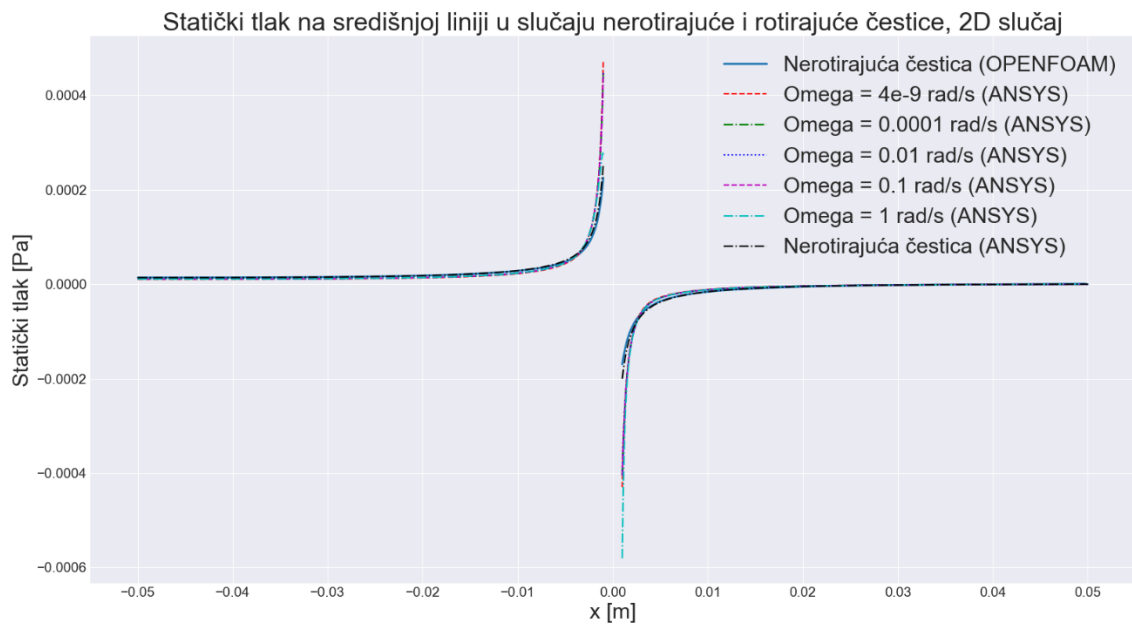


Slika 8.7 Statički tlak u 3D slučaju pri različitim kutnim brzinama rotacije

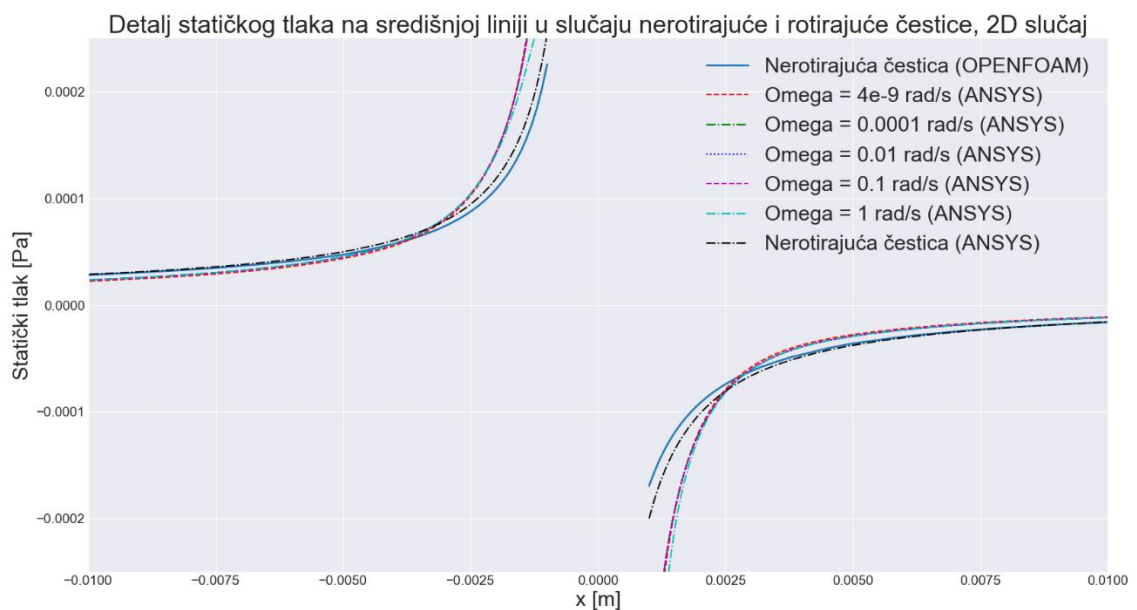
Ponovno, kao i kod magnitude brzine, na temelju statičkog tlaka može se vidjeti sve veće odstupanje od simetričnosti tlaka s obzirom na y-os. Povećanjem kutne brzine rotacije do vrijednosti od $\Omega = 1 \text{ rad/s}$ dolazi do velikog odstupanja u bližoj okolici čestice.

8.2 Usporedba rezultata OpenFOAM/Ansys Fluent

Srednje kvadratno odstupanje izračunato je između podataka dobivenih *OpenFOAM* nestacionarnom simulacijom nerotirajuće čestice i podataka dobivenih *Ansys Fluent* stacionarnom simulacijom. Slike 8.8 i 8.9 prikazuju odstupanja rezultata statičkog tlaka na središnjoj liniji dobivenih *Ansys Fluent* stacionarnom simulacijom u usporedbi s *OpenFOAM* nestacionarnom simulacijom nerotirajuće čestice u 2D slučaju.

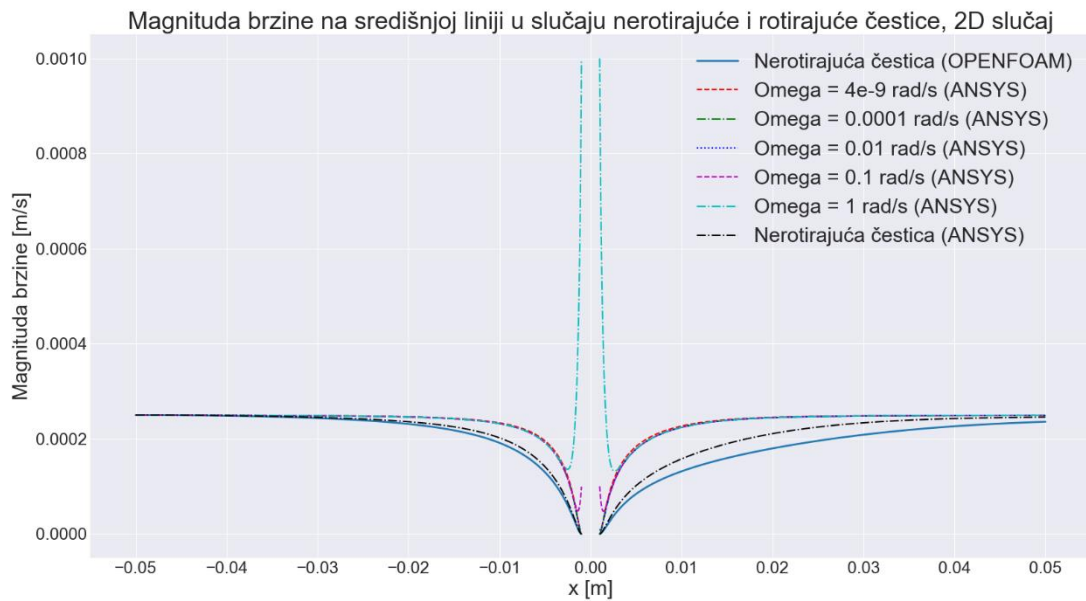


Slika 8.8 Statički tlak na središnjoj liniji, 2D slučaj

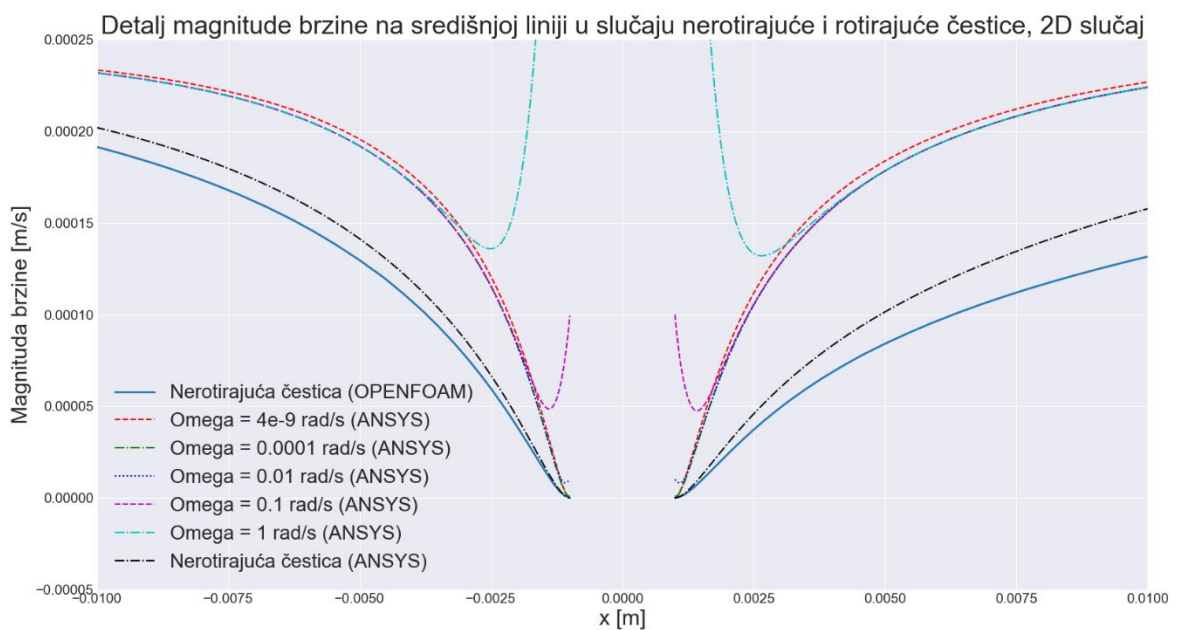


Slika 8.9 Detalj statičkog tlaka na središnjoj liniji, 2D slučaj

Iz slika 8.8 i 8.9 može se uočiti kako povećanjem kutne brzine rotacije čestice statički tlak u neposrednoj okolini naglo raste po apsolutnoj vrijednosti. Slike 8.10 i 8.11 prikazuju odstupanja magnitude brzine na središnjoj liniji dobivenih *Ansys Fluent* stacionarnom simulacijom u usporedbi s *OpenFOAM* nestacionarnom simulacijom nerotirajuće čestice u 2D slučaju.



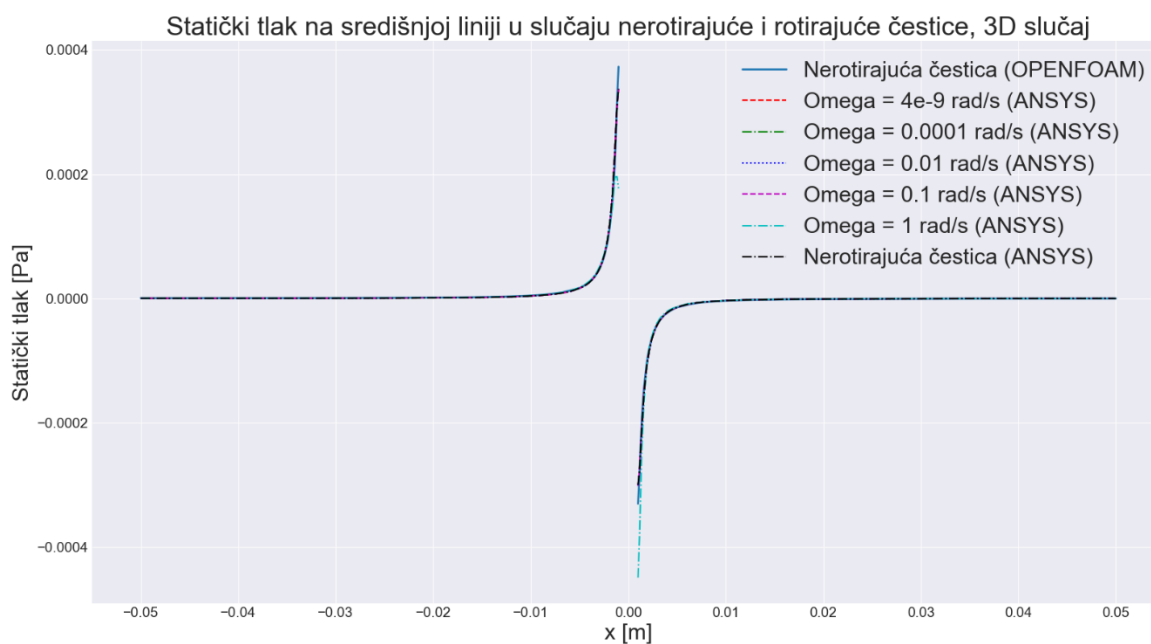
Slika 8.10 Magnituda brzine na središnjoj liniji, 2D slučaj



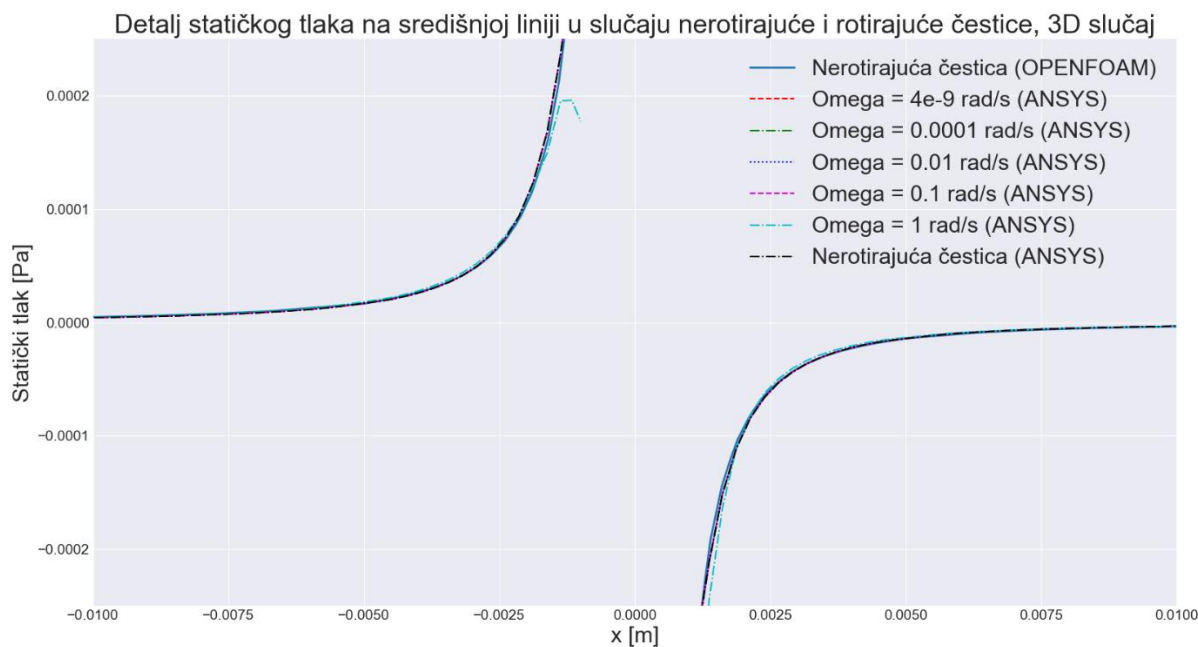
Slika 8.11 Detalj magnituda brzine na središnjoj liniji, 2D slučaj

Iz prikazanih usporedba za 2D slučaj, može se uočiti veće odstupanje u rezultatima dobivenima u *Ansys Fluent*-u, također primjećuje se simetričnost lijeve i desne strane grafa. Povećanjem kutne brzine rotacije uočava se odstupanje u bližoj okolini čestice. Rezultati nerotirajuće čestice za 2D slučaj postavljen u *OpenFOAM*-u i *Ansys Fluent*-u različiti su te su uglavnom statički tlak i magnituda brzine u istim točkama nešto veći kod *Ansys Fluent*-a. Slike 8.12 i 8.13 prikazuju odstupanja rezultata statičkog tlaka na središnjoj liniji dobivenih *Ansys Fluent* stacionarnom

simulacijom u usporedbi s *OpenFOAM* nestacionarnom simulacijom nerotirajuće čestice u 3D slučaju.

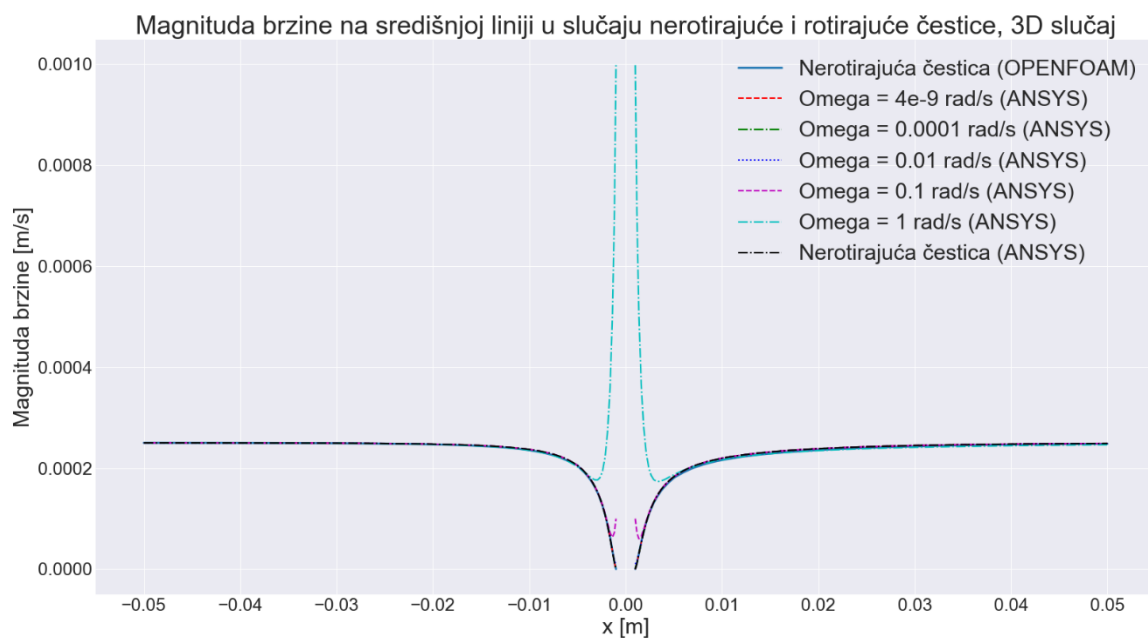


Slika 8.12 Statički tlak na središnjoj liniji, 3D slučaj

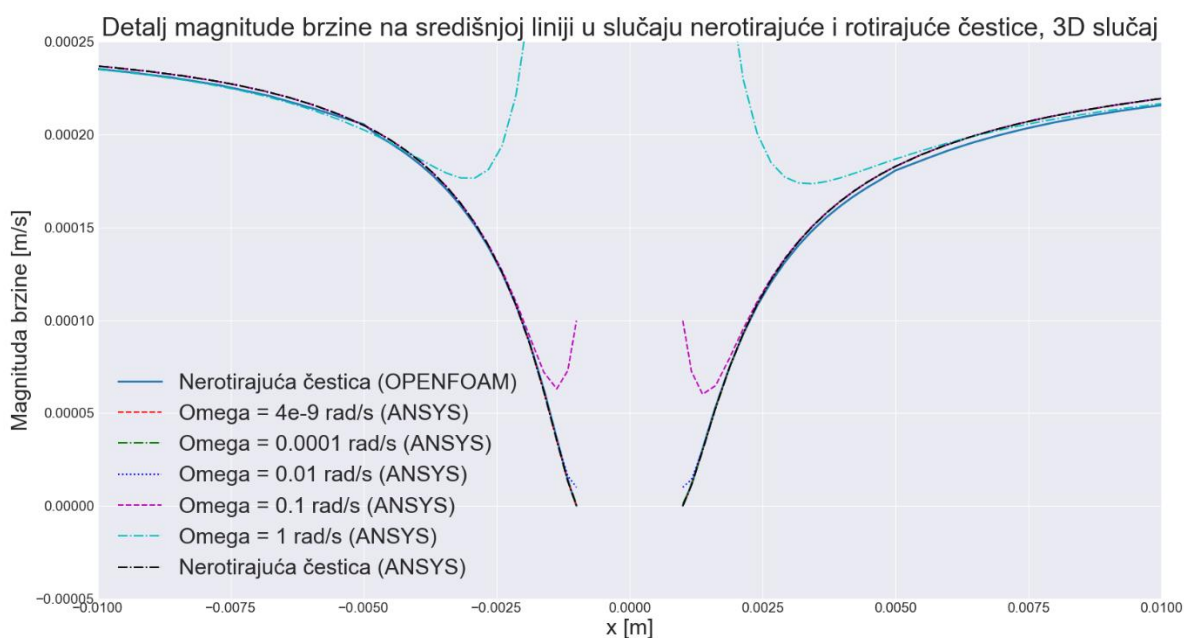


Slika 8.13 Detalj statičkog tlaka na središnjoj liniji, 3D slučaj

Slike 8.14 i 8.15 prikazuju odstupanja magnitude brzine na središnjoj liniji dobivenih *Ansys Fluent* stacionarnom simulacijom u usporedbi s *OpenFOAM* nestacionarnom simulacijom nerotirajuće čestice u 3D slučaju.



Slika 8.14 Magnituda brzine na središnjoj liniji, 3D slučaj



Slika 8.15 Detalj magnituda brzine na središnjoj liniji, 3D slučaj

Za 3D slučaj se iz prethodnih slika može uočiti kako povećanjem kutne brzine rotacije čestice rezultati u bližoj okolini čestice više odstupaju. I kod 3D slučaja u *Ansys Fluent*-u može se uočiti

simetričnost lijeve i desne strane grafa što je zadovoljavajuće. Za 3D slučaj rezultati nerotirajuće čestice u *Ansys Fluent*-u i *OpenFOAM*-u se vrlo dobro vizualno poklapaju.

Srednje kvadratno odstupanje za statički tlak i magnitudu brzine u 2D i 3D slučaju prikazano je u Tablici 8.1. Srednje kvadratno odstupanje mjerilo se za 2D i 3D slučaj odvojeno. Kao podaci u odnosu na koje se je mjerilo odstupanje iskorišteni su rezultati dobiveni u *OpenFOAM* nerotirajućim simulacijama za 2D i 3D slučaj.

Tablica 8.1 Srednje kvadratno odstupanje magnitude brzine i statičkog tlaka

	PRMSE [%]	VRMSE [%]
2D nerotirajući slučaj	0,0127039	0,0090366
2D $\Omega = 4e-9$ rad/s	0,0127039	0,0090366
2D $\Omega = 0,001$ rad/s	0,0122356	0,0091013
2D $\Omega = 0,01$ rad/s	0,0122355	0,0090332
2D $\Omega = 0,1$ rad/s	0,0122499	0,0082688
2D $\Omega = 1$ rad/s	0,0140590	0,0219161
3D nerotirajući slučaj	0,0073684	0,0080458
3D $\Omega = 4e-9$ rad/s	0,0073684	0,0080458
3D $\Omega = 0,001$ rad/s	0,0073684	0,0080400
3D $\Omega = 0,01$ rad/s	0,0073700	0,0079724
3D $\Omega = 0,1$ rad/s	0,0073709	0,0070450
3D $\Omega = 1$ rad/s	0,0076376	0,0128092

Iz Tablice 8.1 može se uočiti kako je odstupanje u slučaju nerotirajuće čestice te pri najmanjoj kutnoj brzini jednako. Rezultati dobiveni u *Ansys Fluent*-u približno su jednaki rezultatima dobivenim *OpenFOAM* nestacionarnom simulacijom.

Uz rezultate statičkog tlaka i magnitude brzine potrebno je usporediti i dobivene sile i koeficijente otpora s analitičkim. Analitička sila otpora i koeficijent otpora izračunati su na sljedeći način iz jednadžbi 3.18 i 3.19:

$$F_D = 6 \cdot \pi \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,001 \cdot 0,00025 = 4,712 \cdot 10^{-9} \text{N}, \quad (8.1)$$

$$C_D = \frac{24}{0,5} = 48. \quad (8.2)$$

Kako bi se dobila sila otpora te koeficijent otpora za simulacije izrađene u *OpenFOAM*-u bilo je potrebno iskoristiti nekoliko opcija koje nudi *Paraview*. Redom su iskorištene opcije *Extract block*, *Extract surface*, *Generate surface normals*, *Calculator* i *Integrate variables*. Sam *Ansys Fluent* nudi opciju za automatsku generaciju sile otpora i koeficijenta otpora. Razlika kod izračuna

je u postavljanju referentnih vrijednosti. Kod izračuna u *Paraview*-u potrebna je bila referentna površina A koja je jednaka površini sfere. U *Ansys Fluent*-u kod 2D i 3D slučaja za referentnu površinu korištena je površina sfere, za udaljenost (*eng. length*) promjer sfere te za dubinu (*eng. depth*) udaljenost od centralne osi do ruba sfere tj. polumjer sfere. Tablice 8.2 i 8.3 prikazuju sile otpora i koeficijente otpora dobivene u provedenim simulacijama uz pomoć *OpenFOAM*-a te *Ansys Fluent*-a u usporedbi s analitičkim rezultatima.

Tablica 8.2 Rezultati dobiveni simulacijama u *OpenFOAM*-u

Slučaj	Koeficijent otpora		Sila otpora [N]	
	2D	3D	2D	3D
Nerotirajuća čestica	17,9015	14,1488	1,7566E-9	1,3884E-9
$\Omega = 4e-9$ rad/s	17,9015	14,1488	1,7566E-9	1,3884E-9
$\Omega = 0.001$ rad/s	17,9015	14,1488	1,7566E-9	1,3885E-9
$\Omega = 0.01$ rad/s	17,9013	14,1486	1,7566E-9	1,3883E-9
$\Omega = 0.1$ rad/s	17,8880	14,1429	1,7553E-9	1,3878E-9
$\Omega = 1$ rad/s	/	14,1681	/	1,3903E-9
Analitički	48	48	4,7124E-9	4,7124E-9

Tablica 8.3 Rezultati dobiveni simulacijama u *Ansys FLUENT*-u

Slučaj	Koeficijent otpora		Sila otpora [N]	
	2D	3D	2D	3D
Nerotirajuća čestica	15,0615	49,7538	1.4779E-9	4.8821E-9
$\Omega = 4e-9$ rad/s	14,9252	49,7811	1.4645E-9	4.8848E-9
$\Omega = 0.001$ rad/s	14,8467	49,8903	1.4568E-9	4.8955E-9
$\Omega = 0.01$ rad/s	14,5078	49,9748	1.4236E-9	4.9038E-9
$\Omega = 0.1$ rad/s	14,8661	51,2888	1.4623E-9	5.0327E-9
$\Omega = 1$ rad/s	14,7496	50,0772	1.4473E-9	4.9138E-9
Analitički	48	48	4.7124E-9	4.7124E-9

Iz tablica 8.2 i 8.3 može se zaključiti kako su rezultati za koeficijent otpora te silu otpora u *OpenFOAM* simulacijama otprilike tri puta manji nego analitički. Isti trend prate rezultati 2D simulacija u *Ansys Fluent*-u, no rezultati 3D simulacija mnogo su bliži analitičkim rezultatima.

9 ZAKLJUČAK

U uvodnom dijelu rada objašnjene su osnove mehanike fluida koje su potrebne za bolje shvaćanje Navier Stokesovih jednažbi. Jedan od specijalnih slučajeva Navier Stokesovih jednažbi jest Stokesov zakon. Zakon je razvijen za opstrujavanje oko sfere u slučaju laminarnog nestlačivog strujanja fluida. Ovaj se zakon može primijeniti na česticu mikroplastike oko koje često opstrujava fluid pri niskim brzinama. Stokesovim zakonom mogu se dobiti analitički podatci za magnitudu brzine i statički tlak u cijeloj domeni. Analitički podatci su kasnije uspoređeni s numeričkim podacima na središnjoj liniji.

Kako bi se postavila numerička simulacija potrebno je izraditi domenu. Kroz rad se ispitivao utjecaj 2D i 3D domene na rezultate. Uz samu razliku u domeni postoji i razlika u numeričkoj mreži. Izrađena mreža za 2D simulacije veće je kvalitete te ima bolju raspodjelu elemenata iako je 3D numerička mreža rađena na sličan način.

U *OpenFOAM*-u i *Ansys Fluent*-u postavljeno je nekoliko simulacija. U slučaju *OpenFOAM* simulacija radilo se o nestacionarnim simulacijama, dok su simulacije postavljene u *Ansys Fluent*-u stacionarne. Fluid koji opstrujava oko čestice mikroplastike je voda te je zadovoljen uvjet laminarnog strujanja uz Reynoldsov broj koji iznosi 0,5. Kako bi se ispitao utjecaj rotacije čestice mikroplastike na rezultate, pokrenuto je nekoliko simulacija s različitim kutnim brzinama za 2D i 3D slučaj domene.

Nestacionarne simulacije nerotirajuće čestice mikroplastike u *OpenFOAM*-u pokazale su malo odstupanje u odnosu na analitičke rezultate. U 2D slučaju dolazi do većeg odstupanja u području nakon čestice mikroplastike, što se najbolje vidi u srednjem kvadratnom odstupanju magnitude brzine. Generalno je 3D slučaj povoljniji za ovakvu vrstu simulacije s obzirom da predstavlja idealnu sferu. Srednje kvadratno odstupanje 3D slučaja u odnosu na analitičke rezultate nekoliko redova veličine manje od srednjeg kvadratnog odstupanja 2D slučaja.

Za rotaciju čestice postepeno se povećavala kutna brzina rotacije od one koja je dobivena izjednačavanjem sila na čestici mikroplastike te iznosi $4 \cdot 10^{-9}$ rad/s. Za najmanju kutnu brzinu rotacije čestice odstupanje je najmanje u odnosu na nerotirajuće slučajeve. Povećanjem kutne brzine rotacije dolazi do većeg odstupanja u magnitudi brzine i statičkom tlaku u bližoj okolini čestice mikroplastike. Uzrok većih odstupanja je *noSlip* uvjet.

Rezultati dobiveni stacionarnim simulacijama u *Ansys Fluent*-u uspoređeni su s rezultatima dobivenima iz nestacionarnih simulacija *OpenFOAM*-a za 2D i 3D slučaj nerotirajuće čestice. Iz srednjeg kvadratnog odstupanja 2D i 3D slučajeva u *Ansys Fluent*-u u odnosu na nerotirajući 2D i 3D slučaj iz *OpenFOAM*-a može se zaključiti kako rezultati ne odstupaju značajno. Zaključci o utjecaju rotacije čestice na rezultate se poklapaju s prethodno dobivenim rezultatima nestacionarne

simulacije. Vrijednosti sile i koeficijenta otpora numeričkih simulacija u *OpenFOAM*-u i *Ansys Fluent*-u imaju jednak red veličine kao analitičko rješenje, no za postizanje veće točnosti potrebna su detaljnija istraživanja pri nižim Reynoldsovim brojevima

10 LITERATURA

- [1] Cengel, Y. A., Cimbala, J. M.: „Fluid Mechanics: Fundamentals and applications“, third edition, New York, 2014.
- [2] Kranjčević, L.: „Mehanika fluida“, Tehnički fakultet, Rijeka, 2022.
- [3] „Viscous and Inviscid Flow“, s interneta, https://www.engineeringarchives.com/les_fm_viscousinviscidflow.html, 23. lipnja 2024.
- [4] „Laminar flow and turbulent flow“, s interneta, <https://www.cradle-cfd.com/media/column/a152>, 23. lipnja 2024.
- [5] Zhang, Y.: „Flow past a sphere and a prolate spheroid at low Reynolds numbers“, A&M University, Texas, 2013.
- [6] Žic, E., Pilat, M.: „Računalna dinamika fluida i metode vizualizacije strujanja fluida“, Građevinski fakultet, Rijeka, 2021. „What are microplastics“, s interneta, <https://oceanservice.noaa.gov/facts/microplastics.html>, 23. lipnja 2024.
- [7] „What are microplastics“, s interneta, <https://oceanservice.noaa.gov/facts/microplastics.html>, 23. lipnja 2024.
- [8] Kranjčević, L., Čarija, Z., Fućak, S.: „Utjecaj numeričke mreže na učinkovitost računalne simulacije“, Tehnički fakultet, Rijeka, 2007.
- [9] S interneta, https://www.researchgate.net/figure/Basic-case-directory-of-OpenFOAM-41_fig2_338864256, 23. lipnja 2024.
- [10] S interneta, <https://openfoam.org/download/10-ubuntu/>, 3. srpnja 2024.
- [11] S interneta, <https://develop.openfoam.com/Development/openfoam/-/tree/master/tutorials/incompressible/pimpleFoam/laminar/cylinder2D>, 6. srpnja 2024.
- [12] Vilović, M.: „Numeričke metode za rješavanje Navier-Stokes jednadžbe“, Prirodoslovno-matematički fakultet, Zagreb, 2020.

SAŽETAK

Cilj ovog rada jest usporedba analitičkih rezultata dobivenih iz Stokesovog zakona s rezultatima dobivenima numeričkom simulacijom. Na samom početku rada opisani su osnovni pojmovi mehanike fluida. Pojašnjeno je dobivanje Stokesovog zakona iz Navier Stokesovih jednažbi. Nakon toga je objašnjena izrada 2D i 3D geometrije kao i izrada numeričke mreže. Prikazano je postavljanje nestacionarne simulacije u *OpenFOAM*-u te stacionarne simulacije *Ansys Fluent*-u. Izrađene su simulacije nerotirajuće čestice mikroplastike te simulacije s nekoliko različitih kutnih brzina rotacije čestice mikroplastike. Napravljena je analiza rezultata koja se temeljila na usporedbi podataka na središnjoj liniji. Odstupanja rezultata izračunata su kao srednje kvadratno odstupanje.

Ključne riječi: mehanika fluida, čestica mikroplastike, Stokesov zakon, simulacija, OpenFOAM, Ansys Fluent

SUMMARY

The aim of this paper is to compare analytic results obtained from Stokes' law with the results obtained by numerical simulation. At the very beginning of the work, the basic concepts of fluid mechanics are described. The derivation of Stokes' law from the Navier Stokes equations is clarified. After that, the creation of 2D and 3D geometry as well as the creation of a numerical mesh was explained. The setup of unsteady simulation in OpenFOAM and steady simulation in Ansys Fluent is shown. Simulations were conducted for non-rotating microplastic particle and for particle with various angular velocities. An analysis of the results was performed, which was based on the comparison of data on the central line. The deviations of the results were calculated as the mean square deviation.

Keywords: fluid mechanics, microplastic particle, Stokes law, simulation, OpenFOAM, Ansys Fluent

POPIS SLIKA

Slika 2.1 Cjevovod od gline i olova [1]	2
Slika 2.2 Kavitacija [1].....	4
Slika 2.3 Ovisnost viskoznosti o temperaturi [1]	8
Slika 2.4 Podjela fluida s obzirom na viskoznost [2].....	8
Slika 2.5 Viskozno i neviskozno područje strujanja fluida [3]	10
Slika 2.6 Reynoldsov eksperiment [4]	11
Slika 2.7 Nestacionarno (trenutno) vs stacionarno (usrednjeno) [1].....	12
Slika 2.8 Komponente rezultantne sile.....	13
Slika 3.1 Centralna linija [5]	18
Slika 4.1 Mikrosfera [7]	21
Slika 4.2 Podjela domene	22
Slika 4.3 Izgled cjelokupne domene	22
Slika 4.4 Piramida koja tvori manju kocku	23
Slika 4.5 Središnja kocka s oduzetom sferom u središtu	24
Slika 4.6 Konačni izgled domene izvana	24
Slika 4.7 2D (lijevo) vs 3D (desno).....	25
Slika 4.8 Tipovi 2D mreže: a. regularna ortogonalna, b. neregularna strukturirana, c. nestrukturirana [8]	25
Slika 4.9 Prva korištena opcija: Edge sizing	26
Slika 4.10 Šesta korištena opcija: Body Sizing.....	27
Slika 4.11 Mreža u blizini čestice	27
Slika 4.12 Mreža u okolici unutarnjeg kvadrata	28
Slika 4.13 Prva korištena opcija: MultiZone.....	29
Slika 4.14 Druga korištena opcija: Body Sizing	29
Slika 4.15 Konačna 3D mreža.....	30
Slika 4.16 Izgled 3D mreže u središnjem presjeku	30
Slika 4.17 Imena zadana na linijama/plohama 2D domene	31
Slika 4.18 Imena zadana na plohama 3D domene	31
Slika 5.1 Mapa slučaja [9].....	33
Slika 5.2 2D slučaj: empty (gore), 3D slučaj: symmetry (dolje).....	35
Slika 5.3 Postavke fluida i vrste simulacije.....	35
Slika 5.4 Rad PIMPLE algoritma [12]	36
Slika 5.5 Podešavanje rotacije čestice.....	37

Slika 5.6 Superračunalo Bura.....	38
Slika 5.7 Slurm skripta	39
Slika 6.1 Magnituda brzine u domeni kod 2D slučaja	40
Slika 6.2 Krupan plan magnitude brzine u okolini sfere 2D slučaj.....	41
Slika 6.3 Raspodjela brzine u 3D domeni	41
Slika 6.4 Krupan plan raspodjele brzina u 3D domeni	42
Slika 6.5 Raspodjela tlaka u 2D domeni	42
Slika 6.6 Raspodjela tlaka u 3D domeni	43
Slika 6.7 Strujnice magnitude brzine za 2D (lijevo) i 3D (desno) slučaj.....	43
Slika 6.8 Graf ovisnosti magnitude brzine s obzirom na poziciju po x osi na središnjoj liniji	44
Slika 6.9 Graf ovisnosti tlaka s obzirom na poziciju po x osi na središnjoj liniji.....	44
Slika 6.10 Magnituda brzine u 2D slučaju pri različitim kutnim brzinama rotacije	46
Slika 6.11 Tlak u okolici čestice kod 2D slučaja pri različitim kutnim brzinama rotacije	46
Slika 6.12 Magnituda brzine u 3D slučaju pri različitim kutnim brzinama rotacije	47
Slika 6.13 Tlak u 3D slučaju pri različitim kutnim brzinama rotacije	48
Slika 6.14 Magnituda brzine na središnjoj liniji	49
Slika 6.15 Detalj magnitude brzine na središnjoj liniji	50
Slika 6.16 Statički tlak na središnjoj liniji.....	50
Slika 6.17 Detalj statičkog tlaka na središnjoj liniji.....	51
Slika 6.18 Magnituda brzine na središnjoj liniji	52
Slika 6.19 Detalj magnitude brzine na središnjoj liniji	52
Slika 6.20 Statički tlak na središnjoj liniji.....	53
Slika 6.21 Detalj statičkog tlaka na središnjoj liniji.....	53
Slika 7.1 Postavljanje stacionarne simulacije, modela i svojstva fluida	55
Slika 7.2 Postavljanje rubnih uvjeta	56
Slika 7.3 Postavke rotacije čestice	56
Slika 8.1 Magnituda brzine 2D (gore) i 3D (dolje) slučaja.....	57
Slika 8.2 Usporedba tlaka za 2D (gore) i 3D slučaj (dolje)	58
Slika 8.3 Strujnice magnitude brzine u 2D i 3D slučaju	58
Slika 8.4 Magnituda brzine pri različitim kutnim brzinama rotacije čestice u 2D slučaju	59
Slika 8.5 Magnituda brzine pri različitim kutnim brzinama rotacije čestice u 3D slučaju	60
Slika 8.6 Statički tlak u 2D slučaju pri različitim kutnim brzinama rotacije	61
Slika 8.7 Statički tlak u 3D slučaju pri različitim kutnim brzinama rotacije	62
Slika 8.8 Statički tlak na središnjoj liniji, 2D slučaj	63
Slika 8.9 Detalj statičkog tlaka na središnjoj liniji, 2D slučaj.....	63

Slika 8.10 Magnituda brzine na središnjoj liniji, 2D slučaj	64
Slika 8.11 Detalj magnitude brzine na središnjoj liniji, 2D slučaj	64
Slika 8.12 Statički tlak na središnjoj liniji, 3D slučaj	65
Slika 8.13 Detalj statičkog tlaka na središnjoj liniji, 3D slučaj.....	65
Slika 8.14 Magnituda brzine na središnjoj liniji, 3D slučaj	66
Slika 8.15 Detalj magnitude brzine na središnjoj liniji, 3D slučaj	66

POPIS TABLICA

Tablica 5.1 Rubni uvjeti za U i p u 2D/3D slučaju	34
Tablica 6.1 Srednje kvadratnog odstupanja za 3D i 2D slučaj u usporedbi s analitičkim rezultatima	45
Tablica 6.2 Srednje kvadratno odstupanje od 2D nerotirajućeg slučaja	51
Tablica 6.3 Srednje kvadratno odstupanje od 3D nerotirajućeg slučaja	54
Tablica 8.1 Srednje kvadratno odstupanje magnitude brzine i statičkog tlaka	67
Tablica 8.2 Rezultati dobiveni simulacijama u OpenFOAM-u.....	68
Tablica 8.3 Rezultati dobiveni simulacijama u Ansys FLUENT-u	68